



TUGAS AKHIR – MO141326

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK ANTAR SILINDER
DENGAN HELICAL RODS BER-GAP UNTUK KONFIGURASI
TANDEM TERHADAP POLA ALIRAN DAN GAYA EKSITASI
VORTEX SHEDDING**

KRESNA HADI DWIPAYANA

NRP. 4312100073

DOSEN PEMBIMBING :

Dr. Eng Rudi W. Prastianto, S.T., M.T.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



UNDERGRADUATE THESIS – MO141326

**EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF DISTANCE BETWEEN
CYLINDER USING HELICAL RODS WITH GAP FOR TANDEM
CONFIGURATION TO FLOW PATTERN STYLES AND EXCITED
VORTEX SHEDDING FORCES**

KRESNA HADI DWIPAYANA

NRP. 4312100073

SUPERVISORS :

Dr. Eng Rudi W. Prastianto, S.T., M.T.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

FACULTY OF MARINE ENGINEERING

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK ANTAR SILINDER
DENGAN HELICAL RODS BER-GAP UNTUK KONFIGURASI
TANDEM TERHADAP POLA ALIRAN DAN GAYA EKSITASI
VORTEX SHEDDING**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

KRESNA HADI DWIPAYANA

NRP . 4312100073

Disetujui oleh:

1. Dr. Eng Rudi W. Prastianto, S.T., M.T (Pembimbing 1)
2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D (Pembimbing 2)
3. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D (Penguji 1)
4. Ir. Joswan Jusuf Soedjono, M.Sc (Penguji 2)
5. Murdjito, M.Sc.Eng (Penguji 3)
6. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D (Penguji 4)
7. Wimala lalitya Dhanistha, S.T., M.T. (Penguji 5)

SURABAYA, JANUARI 2017

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK ANTAR SILINDER
DENGAN HELICAL RODS BER-GAP UNTUK KONFIGURASI TANDEM
TERHADAP POLA ALIRAN DAN GAYA EKSITASI VORTEX SHEDDING**

Nama Mahasiswa : Kresna Hadi Dwipayana
NRP : 4312100073
Departemen : Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing : Dr. Eng Rudi W. Prastianto, S.T., M.T
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Penelitian ini berisi laporan eksperimen laboratorium untuk memeriksa pengaruh jarak antar dua silinder yang dilengkapi *triple helical rods* ber-gap terhadap gaya eksitasi dan pola aliran di belakang struktur tersebut. Dimensi *triple helical rods* ber-gap menggunakan dimensi efisien menurut Sugiwanto (2013). Eksperimen ini dilakukan di Laboratorium *Low Speed Wind Tunnel*, BBTA3 - BPPT, Serpong, Tangerang Selatan. Hasilnya adalah \bar{C}_D dan C_{Drms} silinder depan akan menurun seiring dengan bertambahnya jarak antar silinder (l/D). \bar{C}_D dan C_{Drms} silinder belakang mendapat efek *shielding* berturut – turut untuk \bar{C}_D konfigurasi 1,75D; 3D dan 5D pada $Re\ 4,2 \times 10^4$ sebesar 0,064; 0,213; 0,504 dan C_{Drms} konfigurasi 1,75D; 3D dan 5D sebesar 0,138; 0,265; 0,599. Tidak terjadi perubahan signifikan akibat interferensi antar silinder terhadap \bar{C}_L . Akan tetapi C_{Lrms} mendapat pengaruh interferensi signifikan pada jarak 1,75D di seluruh angka Reynolds dan 5D pada beberapa angka Reynolds berupa kenaikan C_{Lrms} . Untuk analisis pola aliran fluida, jarak 1,75D masuk kedalam kategori W-T1, sedangkan jarak 3D dan 5D masuk kedalam kategori W-T2 menurut klasifikasi Zdravkovich (1987) dan *suppression device* berperan dalam memecah vortex shedding yang terjadi.

Kata kunci : *Vortex Shedding, Koefisien Drag, Koefisien Lift, Pola Aliran, Suppression Device, Shielding Effect*

**EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF DISTANCE BETWEEN
CYLINDER USING HELICAL RODS WITH GAP FOR TANDEM
CONFIGURATION TO FLOW PATTERN STYLES AND EXCITED
VORTEX SHEDDING FORCES**

Nama Mahasiswa : Kresna Hadi Dwipayana
NRP : 4312100073
Departemen : Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing : Dr. Eng Rudi W. Prastianto, S.T., M.T
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

This study contains reports of laboratory experiments to examine the effect of distance between the two cylinders attached by triple helical rods with air-gap to excitation forces and the flow pattern. Dimensions of the model according to (Sugiwanto, 2013). This experiment was conducted at the Laboratory of Low Speed Wind Tunnel, BBTA3 - BPPT, Serpong, South Tangerang. The result are \bar{C}_D and C_{Drms} of the front cylinder decreases with increasing the distance between cylinder (l/D). \bar{C}_D and C_{Drms} of rear cylinder got shielding effects, respectively for \bar{C}_D of configuration 1,75D; 3D and 5D on $Re\ 4,2 \times 10^4$ are about 0,064; 0.213; 0.504 and C_{Drms} are about 0,138; 0,265; 0.599. No significant changes due to interference between the cylinder of the \bar{C}_L . However C_{Lrms} got a significant interference as shifting of C_{Lrms} on the distance 1,75D at whole Reynolds number and on the distance 5D at a few small Reynolds number. For the flow patterns, distance 1,75D classified into W-T1 while the distance of 3D and 5D classified into W-T2 according to the classification of Zdravkovich (1987) and the suppression device plays a role in breaking the vortex shedding.

Key Word : *Vortex Shedding, Drag Coefficient, Lift Coefficient, Flow Pattern, Suppression Device, Shielding Effect*

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Ucapan terima kasih juga penulis berikan kepada Bapak Dr.Eng. Rudi W. Prastianto, S.T., M.T dan Bapak Nur Syahroni, S.T, M.T, Ph.D selaku dosen pembimbing yang selalu mengarahkan dan membimbing penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan Studi Sarjana Strata-1 (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Dalam Tugas Akhir yang berjudul **“STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK ANTAR SILINDER DENGAN HELICAL RODS BER-GAP UNTUK KONFIGURASI TANDEM TERHADAP POLA ALIRAN DAN GAYA EKSITASI VORTEX SHEDDING”** penulis melakukan eksperimen laboratorium untuk mengetahui karakteristik *suppression device* berjenis *triple helical rods* ber-gap yang dipasang pada dua struktur silinder konfigurasi tandem dengan variasi jarak antar silinder dan angka Reynolds.

Penulis sangat terbuka dengan berbagai saran maupun kritik yang membangun sebagai bahan untuk menyempurnakan kekurangan – kekurangan yang ditemui pembaca pada laporan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kemajuan maritim Indonesia.

Surabaya, Januari 2017

Kresna H. Dwipayana

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis secara langsung maupun tidak langsung telah mendapat bantuan dari berbagai pihak baik dalam bentuk material maupun moral. Untuk itu, dengan seluruh kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terimakasih sebagai penghormatan kepada pihak – pihak yang telah membantu tersebut, antara lain :

1. Ibu Choeriatin dan Bapak M. Ashadi selaku ibu dan ayah penulis atas cinta dan dukungan baik secara moral maupun material yang tidak habis – habisnya kepada penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Rudi W. Prastianto, S.T., M.T dan Bapak Nur Syahroni, S.T, M.T, Ph.D selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah banyak memberikan waktu dan saran kepada penulis.
3. Bapak Farid selaku kepala BBTA3 - BPPT dan Bapak Wibi selaku kepala divisi R&D yang telah memberikan izin untuk penggunaan fasilitas laboratorium.
4. Bapak Yudi dan Bapak Tyo selaku pembimbing laboratorium serta Bapak Angga, Bapak Irul, Bapak Andi, Bapak Sahran, Bapak Muhidi dan karyawan – karyawan BBTA3 – BPPT yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuan dan bimbingannya selama eksperimen berlangsung.
5. Keluarga besar Himatekla termasuk kawan – kawan VARUNA, kakak – kakak dan adik – adik atas waktu yang disempatkan bersama penulis selama ini.
6. Bagus, Bepe, Fino, Adit, Afif dan Budi atas dukungan secara langsung maupun tidak langsung sebagai sahabat terdekat penulis selama menjadi mahasiswa.

Semoga seluruh bantuan dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan dari Allah SWT. Amin.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori.....	7
2.2.1 Angka Reynolds	7
2.2.2 Viskositas	8
2.2.3 Kerapatan Udara.....	9
2.2.4 Pengaruh Temperatur terhadap Viskositas Gas	10
2.2.5 Klasifikasi Aliran Fluida yang Melalui Struktur Silinder	11
2.2.6 Vortex Shedding.....	12
2.2.7 Gaya Akibat Vortex Shedding	13
2.2.8 Peralatan Laboratorium	15
a. Wind Tunnel	15
b. Anemometer	16
c. Load Cell	17
d. Smoke Generator	18
e. Kamera High Speed	19

BAB III METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Prosedur Penelitian	22
3.2.1 Studi Literatur	22
3.2.2 Pengumpulan Data	23
3.2.3 Pembuatan Model.....	23
3.2.4 Kalibarsi Alat Ukur	24
a. Kalibrasi Fan Driver	24
b. Kalibrasi Load Cell.....	26
3.2.5 Tahap Validasi Model	27
3.2.6 Tahap Eksperimen.....	29
3.2.7 Hasil dan Pembahasan.....	32
3.2.8 Penarikan Kesimpulan.....	32
BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Validasi Model.....	33
4.2 Hasil Pengujian Gaya Drag Konfigurasi Tandem	37
4.2.1 Koefisien Drag Rata – Rata.....	37
4.2.2 Koefisien Drag Root Mean Square	40
4.2.3 Pengaruh Variasi Jarak terhadap \bar{C}_D dan C_{Drms}	43
4.3 Hasil Pengujian Gaya Lift Konfigurasi Tandem	46
4.3.1 Koefisien Lift Rata – Rata.....	48
4.3.2 Koefisien Gaya Lift Root Mean Square	50
4.3.3 Pengaruh Variasi Jarak terhadap \bar{C}_L dan C_{Lrms}	52
4.4 Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya.....	54
4.5 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder	57
4.5.1 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder Tunggal	58
4.5.2 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder Konfigurasi Tandem	59
BAB V. PENUTUP.....	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Area Interferensi Struktur Silinder (Zdravkovich, 1987).....	5
Gambar 2.2 Pola Interferensi Aliran Dua Struktur Silinder Konfigurasi Jamak (Zdravkovich, 1987)	6
Gambar 2.3. Kurva \bar{C}_D terhadap <i>Reduced Velocity</i> (Papaioannou dkk, 2007)	7
Gambar 2.4. Deformasi Aliran Fluida Akibat <i>Shear Stress</i> (Potter dkk, 2011)..	8
Gambar 2.5. Klasifikasi Pola Aliran Fluida pada Struktur Silinder Polos Blevins, 2001)	11
Gambar 2.6. Skema Terjadinya Fenomena <i>Vortex Shedding</i> (Sumer & Fredsoe, 2006)	12
Gambar 2.7. Arah Gaya Drag dan Gaya Lift terhadap Aliran Fluida	13
Gambar 2.8. Grafik Osilasi Gaya Drag dan Lift dalam Fungsi Waktu (Drescher, 1956; Sumer & Fredsoe 2006)	14
Gambar 2.9. <i>Wind Tunnel</i> Saluran Terbuka (NASA, 2015)	15
Gambar 2.10. Anemometer	16
Gambar 2.11. <i>Load Cell</i>	17
Gambar 2.12. Arah Pembacaan Gaya pada <i>Load Cell S</i>	18
Gambar 2.13. Arah Pembacaan Gaya pada <i>Load Cell Beam</i>	18
Gambar 2.14. <i>Smoke Generator</i>	19
Gambar 2.15. Kamera <i>High Speed</i> FastecImaging – HiSpec 1	20
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian (lanjutan)	22
Gambar 3.3. Fasilitas <i>Low Speed Wind Tunnel</i> BBTA3, BPPT, Serpong (http://baru.lagg.or.id/).....	23
Gambar 3.4. Model Silinder Polos	24
Gambar 3.5. Model Silinder dengan Helics	24
Gambar 3.6. Hasil Kalibrasi <i>Fan Wind Tunnel</i>	25
Gambar 3.7. Hasil Kalibrasi <i>Load Cell S</i> (LC1).....	26
Gambar 3.8. Hasil Kalibrasi <i>Load Cell S</i> (LC2).....	26
Gambar 3.9. Hasil Kalibrasi <i>Load Cell S</i> (LC3).....	27
Gambar 3.10. Hasil Kalibrasi <i>Load Cell Beam</i> (LC4).....	27

Gambar 3.11. Posisi Pemasangan <i>Load Cell</i> untuk Pengujian Gaya Drag	28
Gambar 3.12. Posisi Pemasangan Model Pengujian Tahap Validasi.....	28
Gambar 3.13. Variasi jarak (l/D) Konfigurasi Tandem	29
Gambar 3.14. Instalasi Model di dalam Seksi Uji	29
Gambar 3.15. Posisi Pemasangan <i>Load Cell</i> untuk Pengujian (a) Gaya Drag (b) Gaya Lift.	30
Gambar 3.16. Ilustrasi Pemasangan <i>Load Cell</i> untuk Pengujian Gaya Drag.....	30
Gambar 3.17. Ilustrasi Pemasangan <i>Load Cell</i> untuk Pengujian Gaya Lift.....	31
Gambar 3.18. Pengujian Visualisasi Aliran Fluida Silinder Helics Konfigurasi Tandem	32
Gambar 4.1. \bar{C}_D Silinder Polos Konfigurasi Tunggal (Wieselberger, 1922)	33
Gambar 4.2. Grafik Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Referensi.....	35
Gambar 4.3. Grafik Perbandingan C_{Drms} Silinder Polos dengan C_{Drms} Silinder Helics Tunggal	35
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Silinder Helics Tunggal	37
Gambar 4.5. \bar{C}_D Konfigurasi <i>Tandem</i> 1,75D.....	38
Gambar 4.6. \bar{C}_D Konfigurasi <i>Tandem</i> 3D.....	39
Gambar 4.7. \bar{C}_D Konfigurasi <i>Tandem</i> 5D.....	40
Gambar 4.8. C_{Drms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 1,75D	41
Gambar 4.9. C_{Drms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 3D	42
Gambar 4.10. C_{Drms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 5D	42
Gambar 4.11. \bar{C}_D Silinder Depan Konfigurasi <i>Tandem</i>	43
Gambar 4.12. \bar{C}_D Silinder Belakang Konfigurasi <i>Tandem</i>	43
Gambar 4.13. C_{Drms} Silinder Depan Konfigurasi <i>Tandem</i>	44
Gambar 4.14. C_{Drms} Silinder Belakang Konfigurasi <i>Tandem</i>	45
Gambar 4.15. <i>Shielding Factor</i> Silinder Belakang Dibandingkan API RP 2A-WSD	45
Gambar 4.16. Grafik Perbandingan \bar{C}_L Silinder Polos dengan \bar{C}_L Silinder Helics Tunggal	47
Gambar 4.17. Perbandingan C_{Lrms} Silinder Polos dengan C_{Lrms} Silinder Helics Tunggal	47

Gambar 4.18. \bar{C}_L Konfigurasi <i>Tandem</i> 1,75D	48
Gambar 4.19. \bar{C}_L Konfigurasi <i>Tandem</i> 3D	49
Gambar 4.20. \bar{C}_L Konfigurasi <i>Tandem</i> 5D	49
Gambar 4.21. C_{Lrms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 1,75D.....	50
Gambar 4.22. C_{Lrms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 3D.....	51
Gambar 4.23. C_{Lrms} Konfigurasi <i>Tandem</i> 5D.....	52
Gambar 4.24. \bar{C}_L Silinder Depan Konfigurasi <i>Tandem</i>	53
Gambar 4.25. \bar{C}_L Silinder Belakang Konfigurasi <i>Tandem</i>	53
Gambar 4.26. C_{Lrms} Silinder Depan Konfigurasi <i>Tandem</i>	54
Gambar 4.27. C_{Lrms} Silinder Belakang Konfigurasi <i>Tandem</i>	54
Gambar 4.28. Perbandingan \bar{C}_D dengan Penelitian Sebelumnya	55
Gambar 4.29. Perbandingan C_D osilasi dengan Penelitian Sebelumnya.....	56
Gambar 4.30. Perbandingan C_L osilasi dengan Penelitian Sebelumnya	57
Gambar 4.31. Pola Aliran di Belakang Silinder Polos Tunggal pada v=5m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$).....	58
Gambar 4.32. Pola Aliran Dibelakang Silinder Helics Tunggal pada v=5m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$).....	58
Gambar 4.33. Pola Aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak 1,75D pada v = 5 m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$).....	60
Gambar 4.34. Pola Aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak 3D pada v = 5 m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$).....	60
Gambar 4.35. Pola aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak 5D pada v = 5 m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$).....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Dimensi Model Uji.....	23
Tabel 4.1. Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan Referensi	34
Tabel 4.2. Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Silinder Helics Tunggal	36
Tabel 4.3. Perbandingan C_{Drms} Silinder Polos dengan C_{Drms} Silinder Helics Tunggal.....	37
Tabel 4.4. <i>Shielding Factor</i> Silinder Belakang.....	46

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A. DETAIL PEMBUATAN MODEL UJI

LAMPIRAN B. HASIL PENCATATAN FREKUENSI FAN DRIVER

LAMPIRAN C. DETAIL KALIBRASI LOAD CELL

LAMPIRAN D. DETAIL PERHITUNGAN PENGUJIAN GAYA

LAMPIRAN E. REKAMAN DATA ANEMOMETER

LAMPIRAN F. REKAMAN DATA LOAD CELL

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Fenomena *vortex shedding* adalah fenomena yang lazim ditemui pada aliran fluida yang bergerak melalui sebuah struktur silinder dengan angka Reynolds (Re) di atas 40 (Sumer dan Fredsoe, 2006). Fenomena *Vortex Shedding* secara periodik membangkitkan gaya – gaya pada silinder berupa gaya drag dan gaya lift secara periodik juga sehingga menyebabkan getaran pada struktur yang sering disebut dengan *Vortex Induced Vibration* (VIV). Pada beberapa kasus tertentu seperti pada sambungan pipa yang umumnya berupa sambungan las, getaran ini akan menyebabkan kegagalan fatigue pada struktur tersebut.

Oleh karena itu upaya untuk mengurangi pengaruh *vortex shedding* terhadap getaran struktur terus dilakukan untuk meningkatkan performa dari struktur berbentuk silinder. Menurut Hallam dkk, (1978) dalam Sumer dan Fredsoe (2006) salah satu metode untuk menekan vibrasi akibat *vortex shedding* adalah dengan mengatur *vortex* yang terjadi di belakang struktur. Zdravkovich (1981) dalam Sumer dan Fredsoe (2006) mengklasifikasikan sedikitnya tiga metode untuk mengatur *vortex shedding* menggunakan *suppression device* yaitu: *Surface Protrusion*, *Shrouds* dan *Wake Stabilizers*. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa penggunaan *surface protrusion* berjenis *triple helical rod* ber-gap efektif meredam getaran sekaligus gaya friksi statis yang terjadi pada struktur silinder seperti pada penelitian Sugiwanto (2013) dan Al-Musthofa (2014).

Konfigurasi satu struktur silinder sangat jarang ditemui dalam aplikasi engineering. Biasanya beberapa struktur silinder seperti kaki jacket, raiser maupun konduktor terpasang berdekatan satu - sama lain. Zdrakovich (1987) menunjukkan pola aliran fluida yang melalui dua silinder halus baik pada konfigurasi *tandem* maupun *side – by – side* dimana pada konfigurasi tandem sedikitnya ada dua zona penting klasifikasi jenis pola aliran fluida. Yang pertama adalah zona dimana jarak kedua struktur sangat dekat sehingga tidak terjadi interferensi. Kemudian selanjutnya adalah zona dimana terjadi interferensi antar dua silinder. Pada zona

ini, jarak kedua struktur sangat berpengaruh pada jenis vortex yang terjadi dibelakang silinder kedua.

Kemudian Papaioannou, dkk (2007) menjelaskan mengenai efek spasial dua struktur silinder pada bilangan Reynolds rendah di daerah *wake interference*. Hasilnya adalah interferensi kedua struktur berpengaruh pada gaya drag, gaya lift, amplitudo getaran, resonansi dan *flow pattern* baik pada struktur depan maupun belakang (Papaioannou dkk, 2007).

Beberapa penelitian tersebut di atas mendorong peneliti untuk melakukan eksperimen tentang pengaruh jarak antar dua silinder dengan helical rods ber-gap sebagai suppression device untuk konfigurasi tandem terhadap pola aliran dan gaya eksitasi *vortex shedding*.

Eksperimen dilakukan di dalam laboratorium Balai Besar Teknologi Aerodinamika Aeroelastika dan Aeroakustika (BBTA3), BPPT, Serpong menggunakan wind tunnel sebagai generator aliran fluida.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak antar silinder (l/D) dan *Reynolds Number* (Re) terhadap perubahan koefisien drag yang terjadi di kedua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap?
2. Bagaimana pengaruh variasi jarak antar silinder (l/D) dan *Reynolds Number* (Re) terhadap perubahan koefisien lift yang terjadi di kedua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap?
3. Bagaimana pola aliran fluida yang melalui dua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap akibat variasi jarak antar silinder?

1.3 Tujuan

1. Mengetahui pengaruh variasi jarak antar silinder (l/D) dan *Reynolds Number* (Re) terhadap perubahan koefisien drag yang terjadi di kedua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap.
2. Mengetahui pengaruh variasi jarak antar silinder (l/D) dan *Reynolds Number* (Re) terhadap perubahan koefisien lift yang terjadi di kedua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap

3. Mengetahui pola aliran fluida yang melalui dua struktur silinder tandem dengan helical rod ber-gap akibat variasi jarak antar silinder.

1.4 Batasan Masalah

1. Menggunakan dua silinder identik dengan ukuran panjang (L) 480 mm, diameter (D) 50,8 mm, diameter helix (d) 3 mm, gap helix dengan struktur 3 mm dan diameter serta tebal *end plate* adalah 80 mm dan 5 mm.
2. Menggunakan variasi jarak tandem (l/D) yaitu 1,75D; 3D; 5D.
3. Aliran fluida dibangkitkan menggunakan *low speed wind tunnel* milik BBTA3.
4. Variasi angka Reynolds diatur melalui variasi kecepatan aliran fluida pada rentang kecepatan (v) 5 m/s – 20 m/s dan selisih 1 m/s untuk pengujian gaya.
5. Fluida menggunakan udara.
6. Struktur silinder rigid dengan tumpuan roll yang ditahan *load cell* di kedua tumpuannya sehingga posisi relatif kedua silinder tidak berubah.
7. Spesimen depan dan belakang dipasang sedemikian rupa sehingga posisi relatif *helical rods* ber-gap terhadap silinder tetap sama pada semua variasi pengujian.

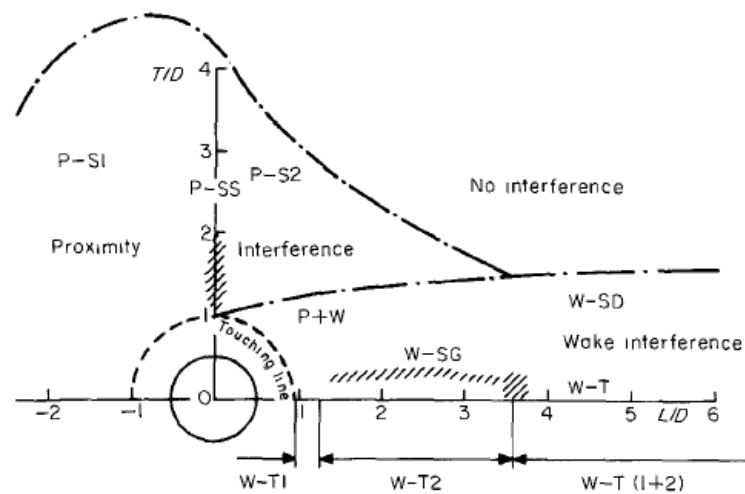
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Interaksi dua struktur silinder dijelaskan oleh Zdrakovich (1987) dimana sedikitnya ada 3 daerah interferensi yaitu daerah *Proximity*, *Interference* dan *Wake Interference* seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.1.

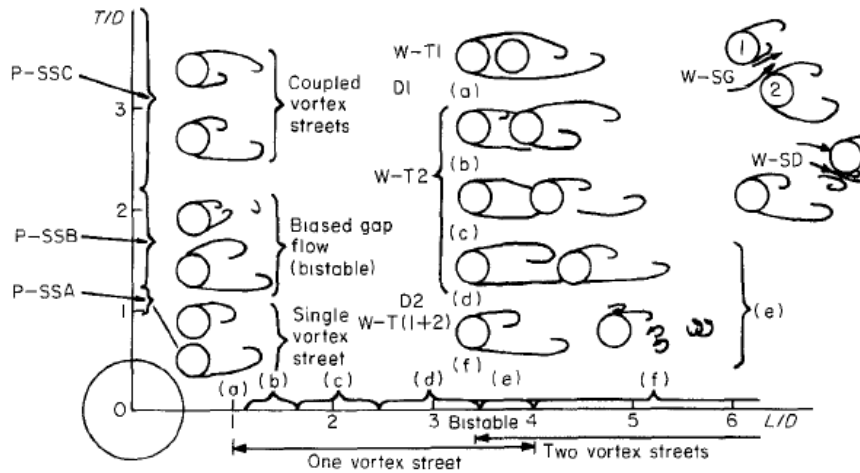


Gambar 2.1. Area Interferensi Struktur Silinder (Zdravkovich, 1987).

Setiap daerah interferensi tersebut akan menghasilkan karakteristik pola aliran yang berbeda – beda. Zdrakovich (1987) mengklasifikasikan karakteristik pola aliran untuk daerah *wake interference* menjadi 3 bagian seperti yang ditunjukkan Gambar 2.2.

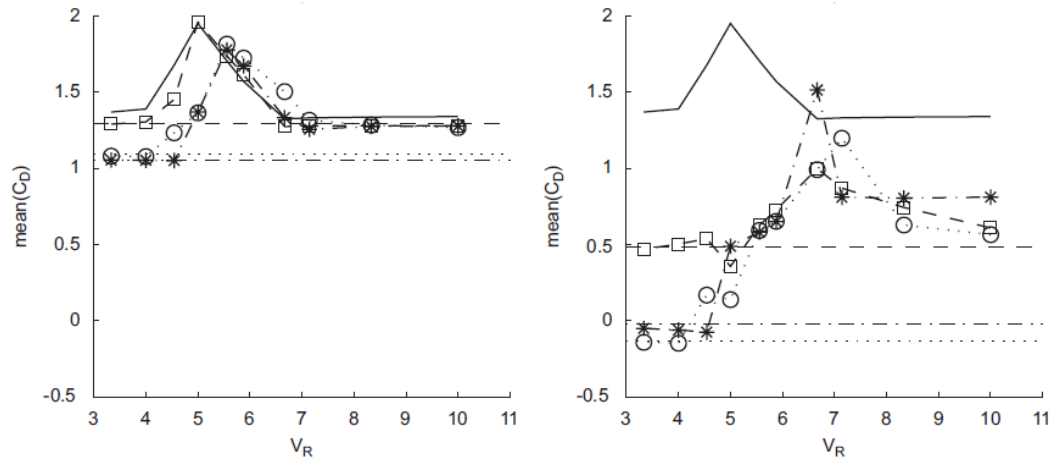
Yang pertama adalah daerah $W-T1$ dengan jarak $1 < L/D < 1,2-1,8$ (tergantung angka Reynolds). Pada daerah ini aliran fluida yang mengenai struktur silinder pertama tidak menyentuh struktur silinder kedua akan tetapi langsung diteruskan ke bagian belakang dari silinder kedua. Hal ini menyebabkan karakteristik aliran fluida yang terbentuk sama dengan karakteristik aliran fluida yang terjadi pada struktur silinder tunggal. Yang kedua adalah daerah $W-T2$ dengan jarak $1.2-1.8 < L/D < 3.4-3.8$ (tergantung angka Reynolds). Pada daerah ini lapisan *shear* yang terpisah pada silinder depan akan menyentuh bagian silinder belakang sehingga *vortex street*

hanya terbentuk di bagian belakang silinder kedua. Kemudian daerah W-T(1+2) dengan jarak $l/D > 3,4 - 3,8$ (tergantung angka Reynolds). Pada daerah ini, *vortex* akan terbentuk di belakang silinder pertama yang kemudian berinteraksi dengan silinder kedua membentuk *binary vortex*. Dua *vortex street* akan terbentuk di belakang silinder kedua yang menyebabkan fluktuasi nilai gaya lift pada silinder kedua (Arie dkk, 1983 dalam Zdrakovich, 1987).



Gambar 2.2 Pola Interferensi Aliran Dua Struktur Silinder Konfigurasi Jamak (Zdravkovich, 1987).

Papaioannou dkk, (2007) memeriksa pengaruh perubahan jarak terhadap respon dua struktur silinder untuk konfigurasi tandem di daerah *wake interference* menggunakan analisa numerik. Hasilnya adalah amplitudo respon, C_D osilasi dan C_L osilasi yang terjadi pada silinder belakang dan silinder depan memiliki kurva yang fluktuatif seiring perubahan jarak l/D . Pada jarak $l/D = 5$, keberadaan silinder belakang hampir sama sekali tidak mempengaruhi C_D dan C_L osilasi dari silinder pertama. Akan tetapi untuk C_D rata – ratanya, silinder depan mengalami penurunan pada jarak $3.5D$ dan kemudian naik kembali pada jarak $5D$. Sedangkan untuk silinder belakang secara umum efek *shielding* yang menyebabkan C_D rata - rata turun hingga mendekati nilai nol berangsur-angsur meningkat seiring dengan pertambahan jarak l/D (Papaioannou dkk, 2007). Kurva C_D rata – rata (\bar{C}_D) pada penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva \bar{C}_D terhadap *Reduced Velocity* (kiri : silinder depan; kanan : silinder belakang). — silinder tunggal; ---o---, tandem P/D=2,5; ---*---, tandem P/D=3,5; ---□---, tandem P/D=5,0. (Papaioannou dkk, 2007).

Kemudian Sugiwanto (2013) membuat sebuah penelitian numerik tentang pengaruh suppression device terhadap gaya drag dan gaya lift yang terjadi pada sebuah struktur silinder. *Suppression device* yang digunakan adalah jenis *triple helical rods* ber-gap dengan variasi pengujian yaitu rasio diameter helics dengan diameter silinder dan rasio gap dengan diameter silinder. Penelitian numerik ini menghasilkan suatu konfigurasi diameter helics dan gap helics optimum yaitu 0,00625D yang mampu menurunkan getaran akibat vortex sebesar 35%.

Al-Musthofa (2014) melakukan eksperimen laboratorium terhadap *triple helical rods* bergap optimum menurut Sugiwanto (2013) yaitu menggunakan rasio diameter helix dan gap helix sebesar 0,00625D. Hasil penelitiannya adalah suppression device tersebut efektif meredam gaya *drag* sebesar 50% pada $Re\ 2,36 \times 10^4$, gaya *lift* sebesar 55% pada $Re\ 2,86 \times 10^4$, dan amplitudo respon sebesar 49% pada $Re\ 3,03 \times 10^4$.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Angka Reynolds

Di dalam analisis pola aliran fluida, parameter – parameter tak berdimensi diperlukan untuk menggambarkan kondisi secara umum dari hasil sebuah penelitian baik secara numerik maupun eksperimen. Parameter – parameter tak berdimensi

digunakan untuk membantu menyajikan penyelesaian suatu fungsi yang kompleks sehingga dapat digunakan sebagai penyelesaian umum dari satu kejadian dengan parameter yang sama. *Reynolds Number* atau angka Reynolds (*Re*) merupakan parameter tak berdimensi yang menyatakan perbandingan gaya inersia dengan gaya friksi viskositas fluida (Blevins, 2001). Lapisan batas (*boundary layer*) terbentuk setelah sebuah aliran fluida menabrak struktur, memisahkan satu aliran *steady uniform* menjadi bentuk aliran lain. Besarnya lapisan batas ini bergantung pada gaya inersia aliran fluida yang menabrak struktur dan viskositas fluida terhadap struktur. Perbandingan kedua gaya ini lah yang kemudian digunakan dalam mengklasifikasikan bentuk pola aliran fluida yang melalui sebuah struktur. Reynolds Number (*Re*) dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut 2.1.

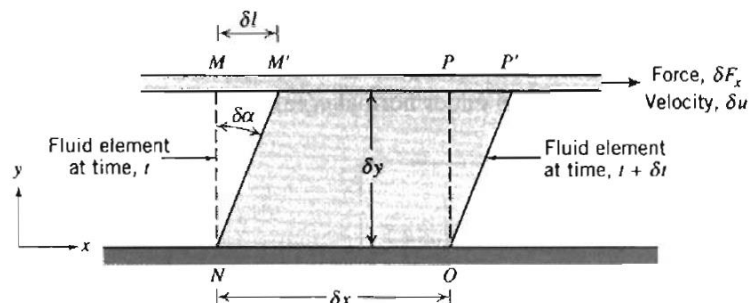
$$\text{Reynold Number } (Re) = \frac{UD}{\nu} \quad 2.1$$

dimana,

- U = kecepatan aliran fluida
- ν = viskositas kinematis fluida (m^2/s)
- D = diameter struktur

2.2.2 Viskositas

Viskositas (μ) adalah suatu parameter fluida yang menyatakan kekentalan atau kelengketan antar partikel fluida (Potter dkk, 2011).



Gambar 2.4. Deformasi Aliran Fluida Akibat *Shear Stress* (Potter dkk, 2011).

Viskositas merupakan suatu sifat tahanan fluida terhadap deformasi akibat *stress*, baik itu *shear stress* maupun *tension stress*. Pada satu nilai *stress* tertentu, fluida dengan nilai viskositas lebih tinggi akan terdeformasi lebih lambat dibanding dengan fluida dengan nilai viskositas lebih rendah.

Viskositas dijelaskan dengan baik melalui diagram deformasi aliran fluida yang ditunjukkan Gambar 2.4. Plat pada salah satu sisi fluida digeser pada kecepatan tertentu sehingga menimbulkan gaya geser pada fluida. Gaya geser ini kemudian menggerakkan fluida dengan kecepatan yang bervariasi terhadap jarak plat atau ditulis $u=u(y)$. Untuk kasus fluida udara yang termasuk kedalam jenis fluida Newtonian, *shear stress* secara langsung berpengaruh pada deformasi (Fox dkk, 2004). Sehingga persamaan *shear stress* fluida Newtonian sebagai fungsi viskositas dinamis dapat ditulis dalam persamaan 2.2.

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y} \quad 2.2$$

Kemudian untuk viskositas kinematis merupakan rasio perbandingan dari viskositas dinamis dengan masa jenis yang biasa dilambangkan dengan ν . Persamaan untuk viskositas kinematis ditulis dalam persamaan 2.3.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2.3$$

dimana,

τ	=	shear stress (kg.m/s ²)
u	=	komponen kecepatan fluida arah horizontal
ρ	=	masa jenis fluida (kg/m ³)
μ	=	viskositas dinamis fluida (kg/m.s)
ν	=	viskositas kinematis fluida (m ² /s)

2.2.3 Kerapatan Udara

Udara merupakan fluida yang termampatkan sehingga masa jenisnya (ρ) sangat terpengaruh oleh perubahan temperatur dan tekanan udara. Pengaruh

temperatur dan tekanan udara terhadap berat jenis dari udara kering dapat dihitung menggunakan persamaan gas ideal pada persamaan 2.4.

$$\rho = \frac{p}{R_{spesifik} T} \quad 2.4$$

dimana,

ρ	=	masa jenis fluida (kg/m ³)
p	=	tekanan udara (N/m ²)
$R_{spesifik}$	=	konstansa spesifik gas untuk udara kering (J/Kg.K)
T	=	temperatur udara (K)

2.2.4 Pengaruh Temperatur terhadap Viskositas Gas

Gerakan molekul udara merupakan gerakan acak kontinyu. Menurut teori kinetik gas pada persamaan 2.5, kecepatan molekul sebanding dengan akar kuadrat dari temperatur sistem gas tersebut (Fox dkk,2004).

$$u \approx \sqrt{T} \quad 2.5$$

Persamaan empiris dari viskositas sebagai fungsi suhu mengacu pada Hukum Sutherland pada persamaan 2.6 yaitu sebagai berikut :

$$\mu = \frac{bT^{1/2}}{1 + S/T} \quad 2.6$$

dimana,

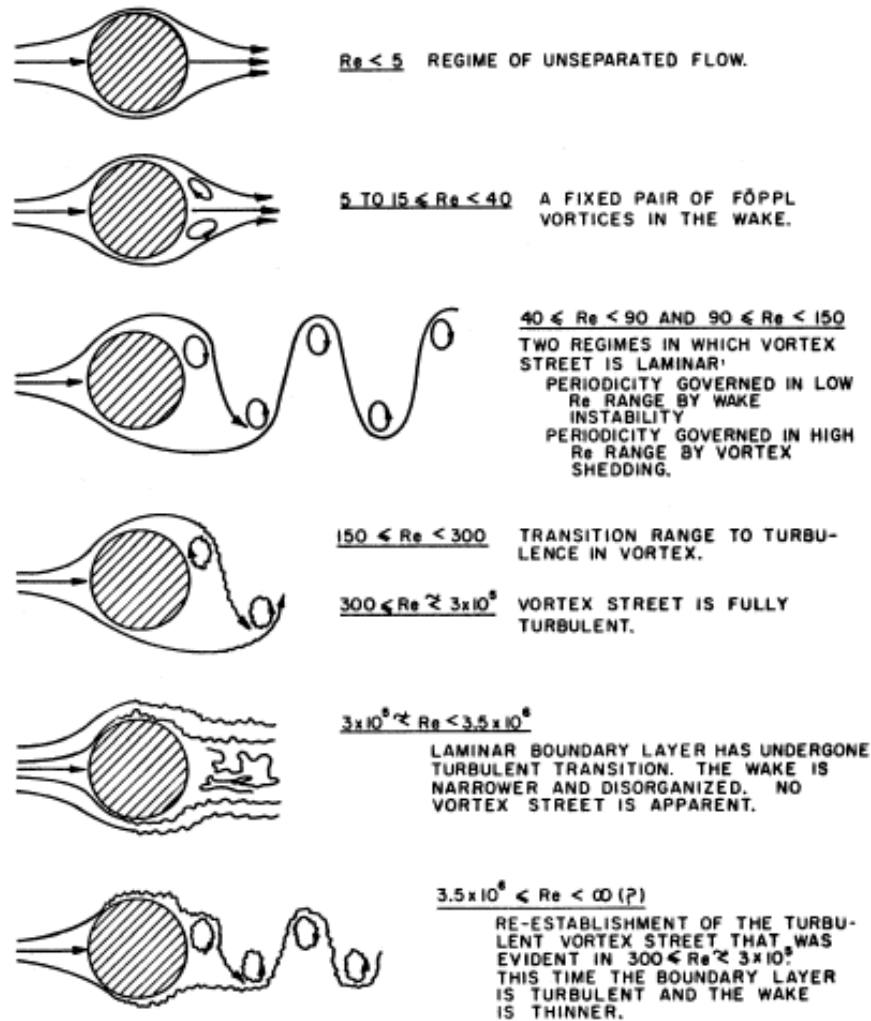
u	=	komponen kecepatan fluida arah horizontal
μ	=	viskositas dinamis fluida (kg/m.s)
T	=	temperatur gas (K)

Sedangkan untuk nilai konstanta b dan S sebagai berikut:

b	=	$1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/msK}^{1/2}$
S	=	110,4 K

2.2.5 Klasifikasi Aliran Fluida yang Melalui Struktur Silinder

Pola aliran fluida yang melalui sebuah struktur silinder bergantung pada sebuah parameter *Reynolds Number*. Setiap angka Reynolds memiliki pola aliran fluida yang berbeda – beda, akan tetapi menurut Liendhard (1966) dalam Blevins (2001) pola aliran tersebut sedikitnya dapat dikelompokkan ke dalam enam kelompok.



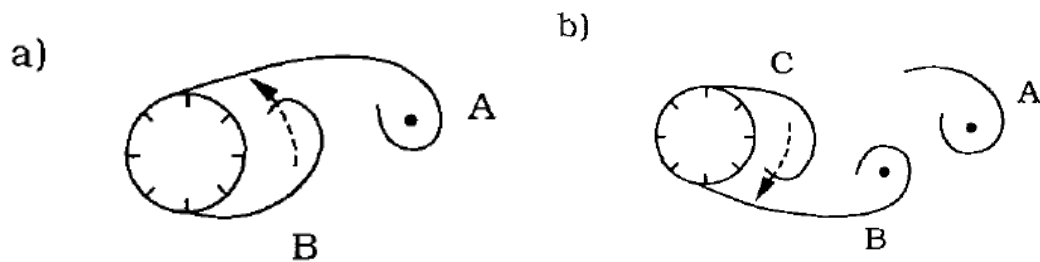
Gambar 2.5. Klasifikasi Pola Aliran Fluida pada Struktur Silinder Polos
(Blevins, 2001).

Untuk fluida dengan angka *Reynolds* kurang dari 5, fluida yang melalui struktur silinder akan mengikuti kontur dari silinder tersebut. Pada kondisi ini tidak terjadi pemisahan aliran fluida dan disebut dengan *Regime of Unseparated Flow*.

Pada angka *Reynolds* $5 < Re < 40$ terjadi pola aliran fluida simetris dengan dua *fix vortex* berlawanan arah yang terjebak didalam aliran. Pada angka *Reynolds* $40 < Re < 90$ mulai terjadi pelepasan *vortex* yang membentuk pola *laminar vortex streets* yang disebabkan karena ketidakstabilan area *wake* atau area di belakang silinder. Pada angka *Reynolds* $90 < Re < 150$ juga terjadi *laminar vortex streets* akan tetapi disebabkan karena pelepasan *vortex*. Untuk kondisi $150 < Re < 300$ dan $300 < Re < 3 \times 10^5$ terjadi pola *turbulence vortex streets* dimana pada kondisi $300 < Re < 3 \times 10^5$ disebut dengan daerah *subcritical*. Pada kondisi *transitional* ($3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$) terjadi *turbulence* di seluruh lapisan batas dan koefisien *drag* turun hingga 0.3 (Farel, 1981 dalam Blevins, 2001). Pada kondisi *supercritical* ($Re > 3 \times 10^6$) pola *turbulence vortex streets* terbentuk kembali dengan *turbulence* pada seluruh lapisan batas (Roshko, 1961 dalam Blevins, 2001).

2.2.6 Vortex Shedding

Vortex shedding terjadi sejak angka *Reynolds* mencapai di atas 40 (Sumer & Fredsoe, 2006). Pada kondisi ini lapisan batas pada silinder akan terpisah akibat perbedaan tekanan yang disebabkan oleh perbedaan geometri pola aliran fluida di kedua sisi silinder. Akibatnya *vortex* berlawanan arah yang terbentuk di kedua sisi memiliki ukuran yang berbeda seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6-a.



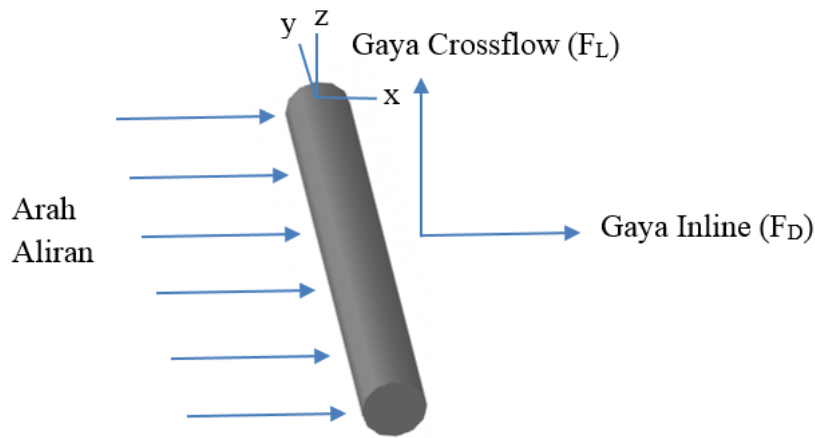
Gambar 2.6. Skema Terjadinya Fenomena *Vortex Shedding*. (gambar a) Vortex kecil B memotong aliran yang mendukung Vortex besar A. (gambar b) Pelepasan Vortex A. (Sumer & Fredsoe, 2006).

Pertumbuhan *vortex* yang memiliki ukuran lebih kecil pada suatu saat akan memotong aliran yang menyokong pertumbuhan *vortex* yang lebih besar (Sumer & Fredsoe, 2006). Akibatnya *vortex* yang lebih besar akan terlepas dan kemudian

meninggalkan vortex yang lebih kecil (Gambar 2.6-b). Fenomena ini berulang pada suatu periode tertentu yang kemudian disebut fenomena *Vortex Shedding*.

2.2.7 Gaya Akibat Vortex Shedding

Aliran fluida di sekitar silinder akan membangkitkan gaya resultan pada silinder tersebut. Gaya yang terjadi pada silinder ini dibagi kedalam dua kategori berdasarkan arah bekerjanya, yaitu arah *inline* terhadap arah arus yang disebut gaya drag (F_D) dan arah *crossflow* terhadap arah arus yang disebut gaya lift (F_L) (lihat Gambar 2.7).



Gambar 2.7. Arah Gaya Drag dan Gaya Lift terhadap Aliran Fluida.

Pola aliran yang berubah akibat fenomena *vortex shedding* akan menyebabkan perubahan besarnya tekanan dan gaya yang bekerja pada silinder secara periodik. Ketika vortex shedding terjadi, C_D dan C_L berubah secara periodik pada nilai mean drag (\bar{C}_D) tertentu dan mean lift (\bar{C}_L) sama dengan nol (Drescher, 1956; Sumer dan Fredsoe, 2006). C_D berosilasi pada suatu nilai mean drag (\bar{C}_D) tertentu dimana nilai mean drag merupakan komponen gaya friksi dan osilasi drag (\dot{C}_D) merupakan komponen gaya akibat perubahan tekanan (Sumer & Fredsoe, 2006). Koefisien drag dan lift dapat diperoleh melalui persamaan 2.7, 2.8 dan 2.9.

$$\dot{C}_D = \frac{\dot{F}_D}{\frac{1}{2}\rho LDU^2} \quad 2.7$$

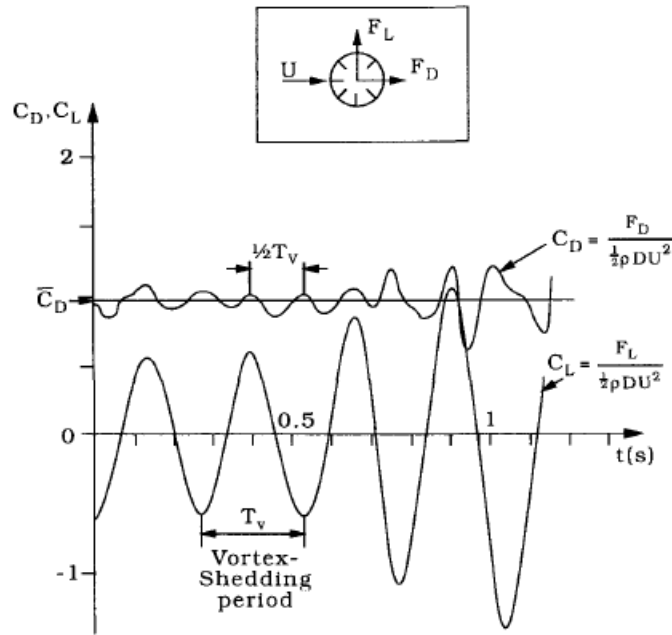
$$\bar{C}_D = \frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho LDU^2} \quad 2.8$$

$$\dot{C}_L = \frac{\dot{F}_L}{\frac{1}{2}\rho LDU^2} \quad 2.9$$

Menurut percobaan Drescher (1956) dalam Sumer & Fredsoe (2006) seperti pada gambar 2.8, frekuensi osilasi gaya drag adalah dua kali frekuensi vortex shedding sedangkan frekuensi osilasi gaya lift sama dengan frekuensi vortex sheddingnya. Kemudian Asyikin (2012) menuliskan gaya – gaya tersebut kedalam sebuah formulasi sebagai pada persamaan 2.10 dan 2.11. Dalam statistika, komponen osilasi biasa diwakili oleh komponen *root mean square* (Sumer & Fredsoe, 2006).

$$F_L = \dot{F}_L \sin(\omega_s t + \phi_s) \quad 2.10$$

$$F_D = \bar{F}_D + \dot{F}_D \sin(2\omega_s t + \phi_s) \quad 2.11$$



Gambar 2.8. Grafik Osilasi Gaya Drag dan Lift dalam Fungsi Waktu (Drescher, 1956; Sumer & Fredsoe 2006).

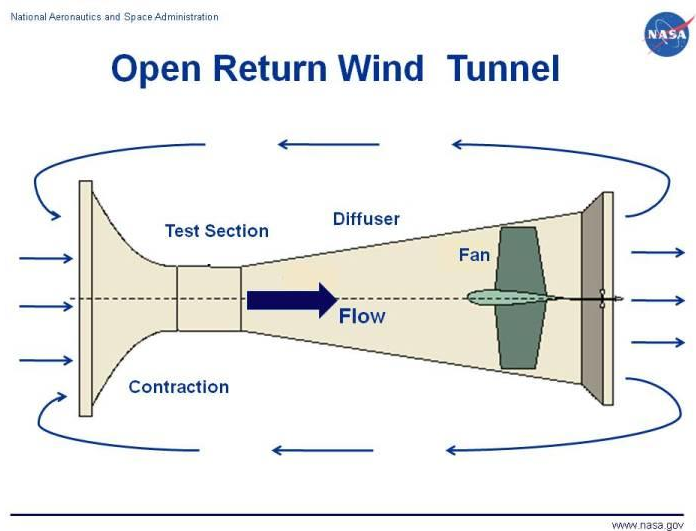
dimana,

F_L	=	gaya lift (kg.m/s^2)
F_D	=	gaya drag (kg.m/s^2)
\bar{F}_D	=	Mean drag (kg.m/s^2)
\dot{F}_L	=	Amplitudo osilasi gaya lift (kg.m/s^2)
\dot{F}_D	=	Amplitudo osilasi gaya drag (kg.m/s^2)
ω_s	=	frekuensi vortex shedding (rad/s)
\dot{C}_L	=	koefisien osilasi gaya lift
\dot{C}_D	=	koefisien osilasi gaya drag
\bar{C}_D	=	koefisien mean drag
L	=	panjang silinder (m)

2.2.8 Peralatan Laboratorium

a. Wind Tunnel

Wind Tunnel (Gambar 2.9) merupakan sebuah alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamis untuk mempelajari efek dari udara yang bergerak melewati benda padat.



Gambar 2.9. *Wind Tunnel* Saluran Terbuka (NASA, 2015).

Berdasarkan bentuknya, wind tunnel memiliki dua jenis, yang pertama adalah saluran tertutup (*closed circuit*) dan saluran terbuka (*open circuit*). Pada umumnya wind tunnel saluran terbuka terdiri atas *fan*, ruang *diffuser*, *test section*, ruang *contraction* dan *settling chamber*. *Fan* atau kipas merupakan komponen utama penghasil aliran udara. *Fan* yang dihubungkan dengan sistem penggerak menyedot udara dari luar untuk memasuki terowongan. Kemudian udara yang masuk kedalam *inlet wind tunnel* memasuki bagian *settling chamber* yang berfungsi untuk mengubah aliran udara menjadi aliran laminar. Selanjutnya aliran udara masuk kedalam ruang *contraction* yang berfungsi untuk menaikkan kecepatan aliran. Aliran udara dari ruang *contraction* masuk kedalam ruang seksi uji dengan kecepatan tertentu yang digunakan untuk menguji spesimen uji. Setelah itu aliran udara masuk kedalam ruang *diffuser* untuk menaikkan tekanan udara sehingga kecepatannya menurun dan keluar dari *wind tunnel* (Hanifah & Handayani, 2015). Untuk melakukan pengujian di dalam wind tunnel, benda uji diinstrumentasi dengan beberapa alat ukur yang sensitif terhadap suatu parameter tertentu seperti gaya angkat (*lift*) gaya hambat (*drag*), tekanan, frekuensi, dan lain sebagainya.

b. Anemometer

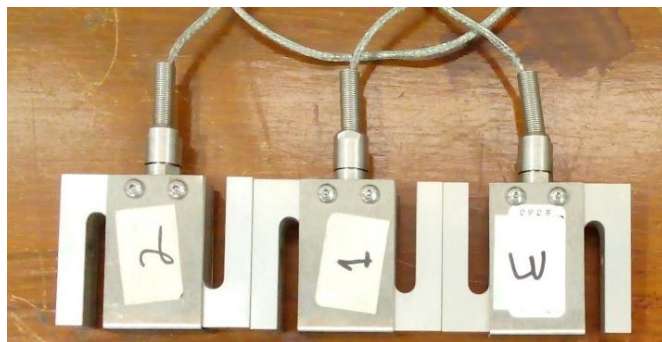
Anemometer merupakan alat untuk mengukur kecepatan aliran udara. Alat ini mendeteksi perubahan sifat fisik fluida yang kemudian ditransfer menjadi sebuah data kecepatan aliran. Beberapa jenis anemometer juga dapat mendeteksi perubahan temperatur dan kelembaban udara sekaligus. Didalam pengujian menggunakan wind tunnel, anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara dan temperatur di dalam seksi saat pengujian berlangsung. Anemometer yang digunakan ditunjukkan oleh Gambar 2.10



Gambar 2.10. Anemometer.

c. Load Cell

Load cell adalah sejenis transducer atau alat yang dapat merubah satu bentuk energi menjadi bentuk yang lain. Load cell digunakan untuk mendeteksi gaya dan merubahnya dalam bentuk sinyal listrik. Ada tiga jenis load cell berdasarkan cara kerjanya, yaitu pneumatic load cell, hydraulics load cell dan strain gauge load cell.



(a)

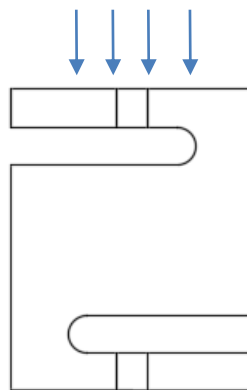


(b)

Gambar 2.11. Load Cell (a) Load Cell jenis S (b) Load Cell jenis Beam.

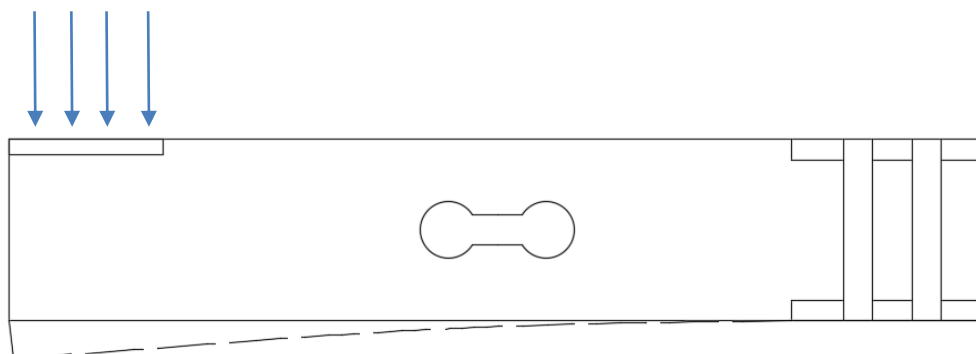
Strain gauge load cell merupakan jenis load cell yang mendeteksi deformasi untuk menentukan besarnya gaya yang bekerja yang kemudian ditransfer menjadi sinyal elektrik. Didalam penelitian ini, load cell digunakan untuk mengukur besarnya gaya drag dan gaya lift yang terjadi pada model. Load cell yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3 buah load cell jenis S dan 1 buah load cell jenis beam (Gambar 2.11). Kedua load cell yang digunakan dalam penelitian ini adalah single axis load cell atau load cell satu arah berkapasitas 25 lb untuk loadcell S dan 10 Kg untuk loadcell beam. Loadcell single axis adalah loadcell yang hanya mendeteksi gaya searah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13

Arah Beban Tekan



Gambar 2.12. Arah Pembacaan Gaya pada *Load Cell S*.

Arah Beban Tekan



Gambar 2.13. Arah Pembacaan Gaya pada *Load Cell Beam*.

d. *Smoke Generator*

Merupakan pembangkit asap yang digunakan untuk melihat *flow visualization* pada eksperimen *wind tunnel*. Prinsip yang digunakan adalah mengalirkan asap pada aliran fluida yang masuk kedalam wind tunnel. Asap yang dihasilkan dari alat ini berasal dari paraffin atau *white oil* yang dipanaskan. Asap tersebut kemudian dipompa keluar dari *smoke generator* melewati *nozzle* yang berfungsi untuk memusatkan dan meningkatkan kecepatan aliran asap. Smoke generator yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. *Smoke Generator*.

e. *Kamera High Speed*

Perubahan aliran fluida yang terjadi sangat cepat tidak akan mampu ditangkap menggunakan kamera biasa. Untuk itu, kamera *high speed* digunakan untuk menangkap rekaman video visualisasi aliran fluida yang terjadi saat pengujian. Kamera yang digunakan adalah FastecImaging – HiSpec 1 (Gambar 2.15). Kamera digital biasa pada umumnya memiliki spesifikasi kurang dari 60 fps (frame per second), akan tetapi kamera high speed ini dapat merekam gerakan hingga 112.000 frame gambar per detik. Gambar – gambar tersebut kemudian dirangkai menjadi sebuah video slow motion (video yang diperlambat). Pencahayaan adalah hal yang penting dalam penggunaan kamera jenis

ini karena frekuensi lampu biasa tidak cukup cepat untuk menandingi kecepatan pengambilan gambar.



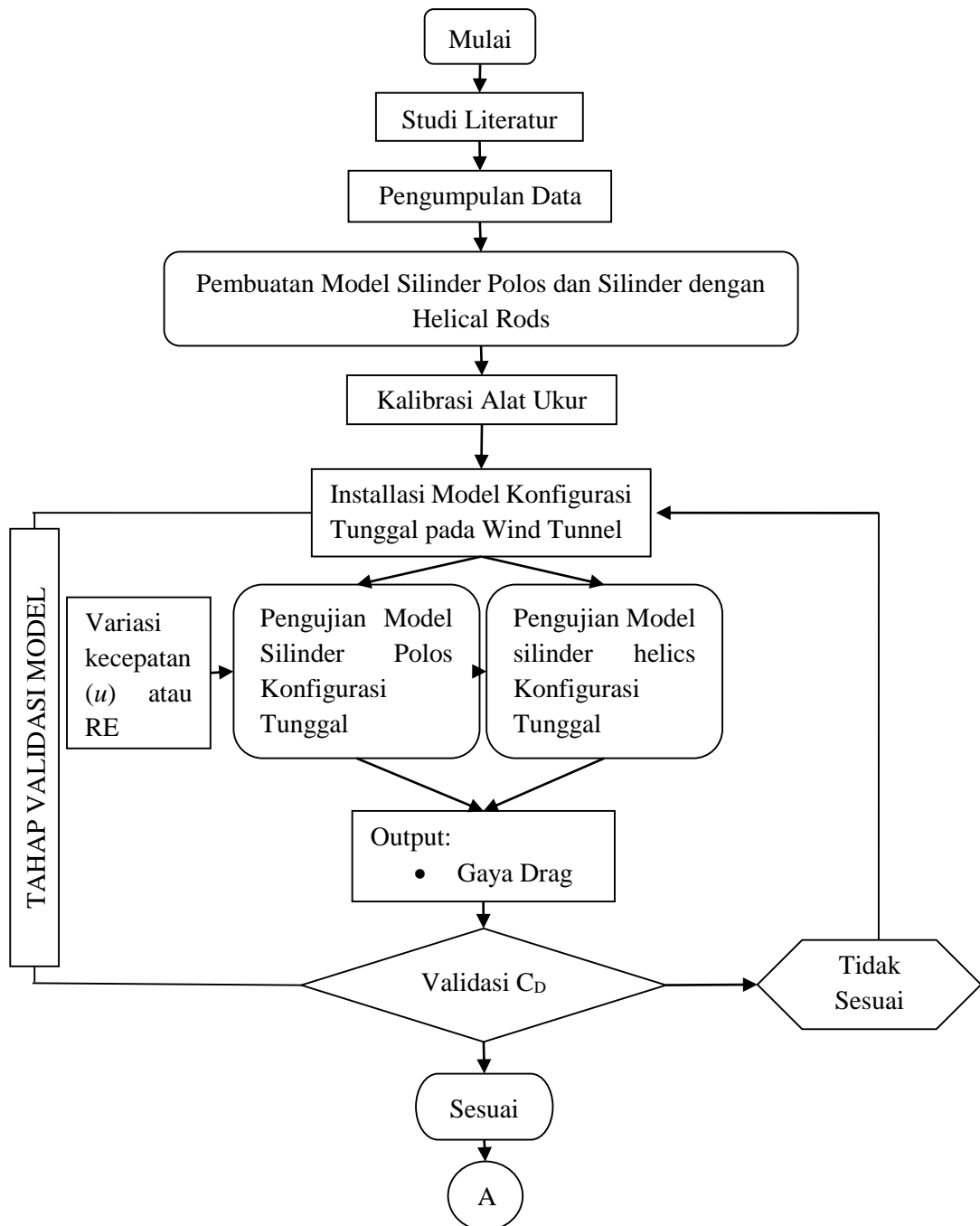
Gambar 2.15. Kamera High Speed FastecImaging – HiSpec 1.

BAB III

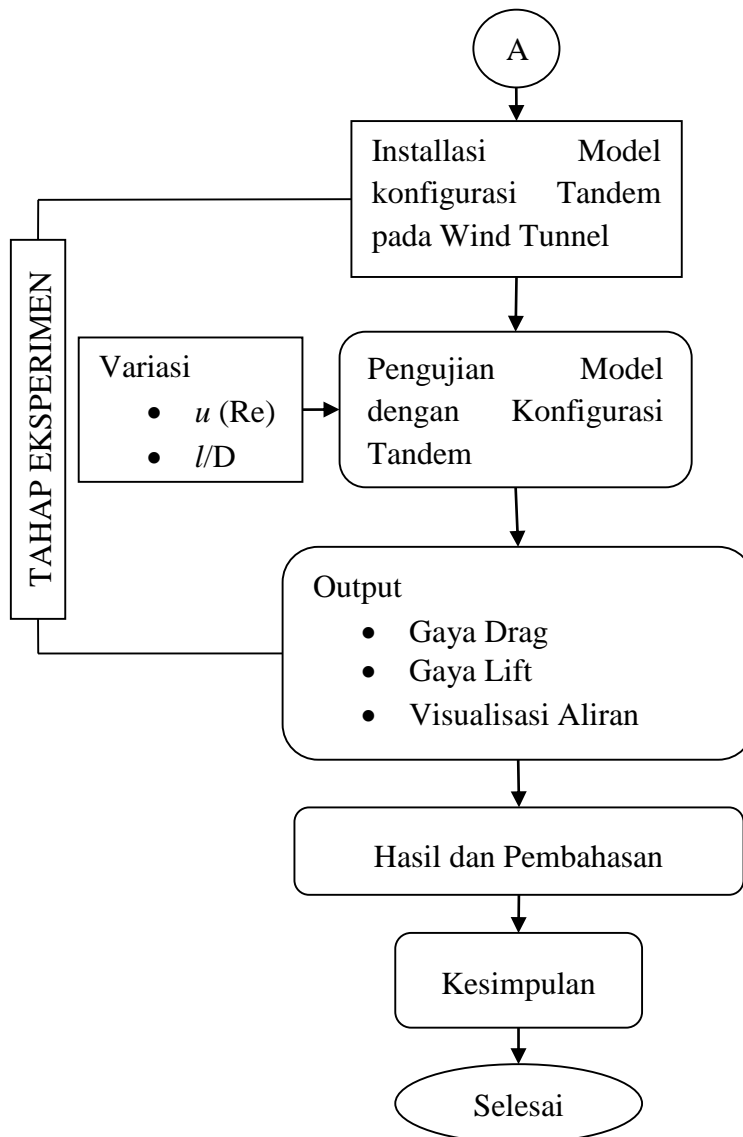
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian pada tugas akhir ini dijelaskan secara ringkas melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (lanjutan).

3.2 Prosedur Penelitian

Tahapan yang dilakukan penulis untuk menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Studi Literatur

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini dilakukan proses studi literatur, yaitu kajian terhadap berbagai macam literatur yang terkait dengan permasalahan Tugas Akhir. Literatur yang dikaji berupa buku-buku, jurnal internasional, thesis dan publikasi ilmiah lainnya.

3.2.2 Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan fasilitas *Low Speed Wind Tunnel* (Gambar 3.3) milik Balai Besar Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika (BBTA3), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) di kawasan PUSPITEK, Serpong. Fasilitas *wind tunnel* merupakan jenis terowongan angin jenis hisap terbuka dan memiliki ukuran seksi uji sebesar 0,72m x 0,5 m x 0,5 m. Aliran fluida dibangkitkan menggunakan propeller. Rentang kecepatan aliran yang dapat dibangkitkan adalah sebesar 5-45 m/s.



Gambar 3.3. Fasilitas *Low Speed Wind Tunnel* BBTA3, BPPT, Serpong
(<http://baru.lagg.or.id/>).

3.2.3 Pembuatan Model

Proses pembuatan spesimen yang dengan ukuran yang disesuaikan dengan ukuran seksi uji LSWT. Pembuatan spesimen ini mengacu pada hasil penelitian Sugiwanto (2011) tentang rasio gap dan diameter helical rod (d) terhadap diameter silinder (D).

Tabel 3.1 Dimensi Model Uji

Data	Rasio	Nilai	Satuan
Panjang Silinder (L)	-	480	mm
Diameter Silinder (D)	-	50,8	mm
Diameter Helics (d)	0.625D	3	mm
Gap	0.625D	3	mm

Spesimen dibuat sebanyak dua buah dengan ukuran dan properti yang identik dengan ukuran yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Gambar 3.4 dan Gambar 3.5 merupakan contoh model yang silinder yang digunakan dalam pengujian. Detail pembuatan model dapat dilihat dalam Lampiran A.



Gambar 3.4. Model Silinder Polos



Gambar 3.5. Model Silinder dengan Helics

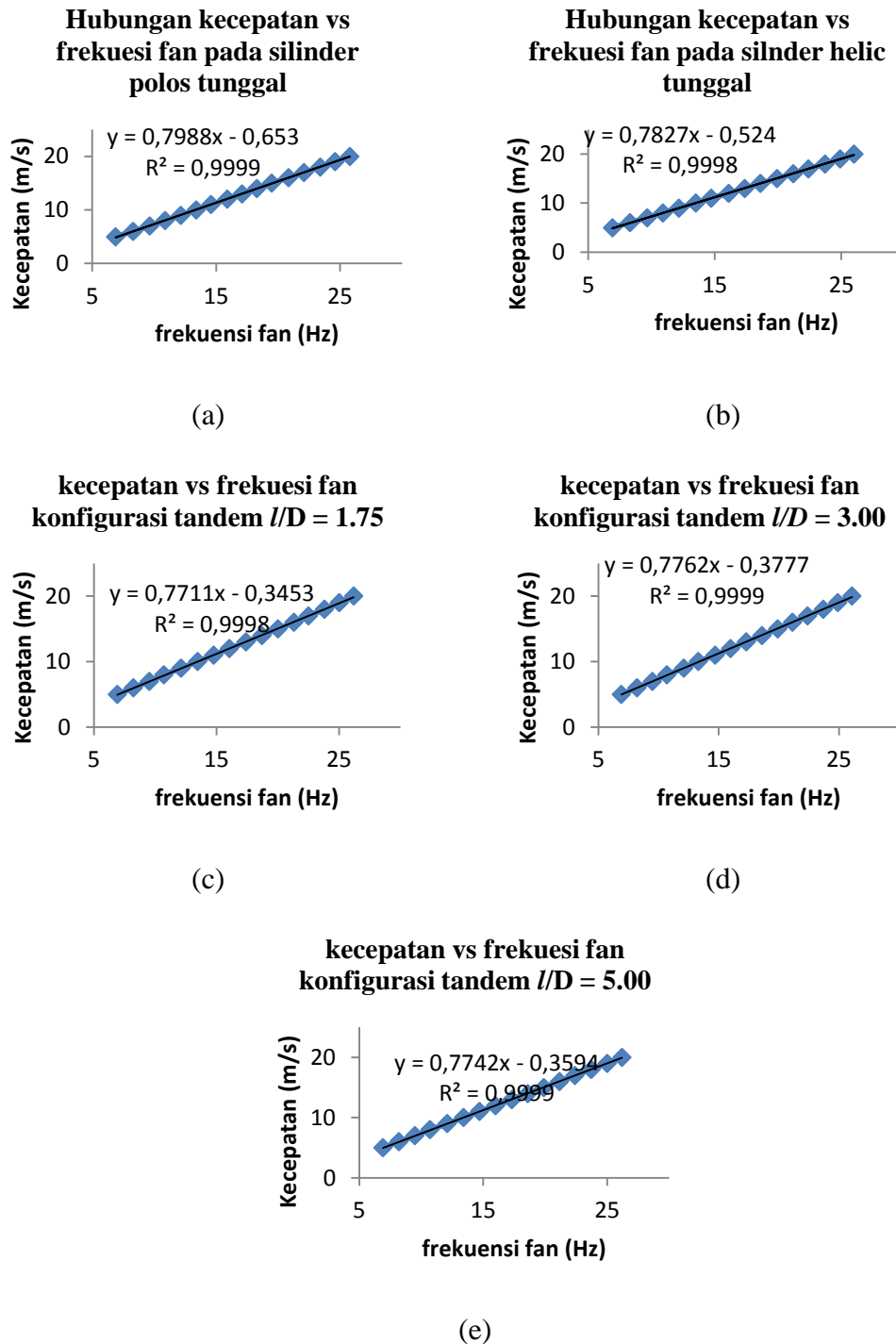
3.2.4 Kalibrasi Alat Ukur

Kalibrasi bertujuan untuk menentukan kebenaran konvensional dari nilai yang ditunjukkan alat ukur. Pada tahap ini ada dua alat yang memerlukan proses kalibrasi sebelum digunakan, yang pertama adalah *fan driver* dan yang kedua adalah *loadcell*.

a. Kalibrasi *Fan Driver*

Aliran udara didalam *wind tunnel* dibangkitkan dari sebuah kipas (*Fan*) yang frekuensinya diatur menggunakan sebuah peralatan yang disebut *fan*

driver. Pengaturan frekuensi kipas bertujuan untuk mengatur kecepatan aliran udara di dalam seksi uji. Frekuensi kipas untuk membangkitkan kecepatan tertentu akan berbeda-beda pada setiap model.

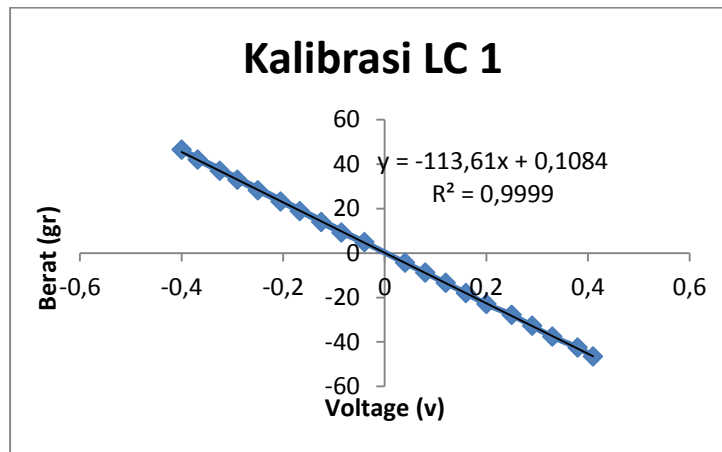


Gambar 3.6. Hasil Kalibrasi *Fan Wind Tunnel*. Untuk (a) silinder polos tunggal ; (b) silinder helix tunggal ; (c) konfigurasi tandem $l/D = 1.75$; (d) konfigurasi tandem $l/D = 3.00$; (e) konfigurasi tandem $l/D = 5.00$.

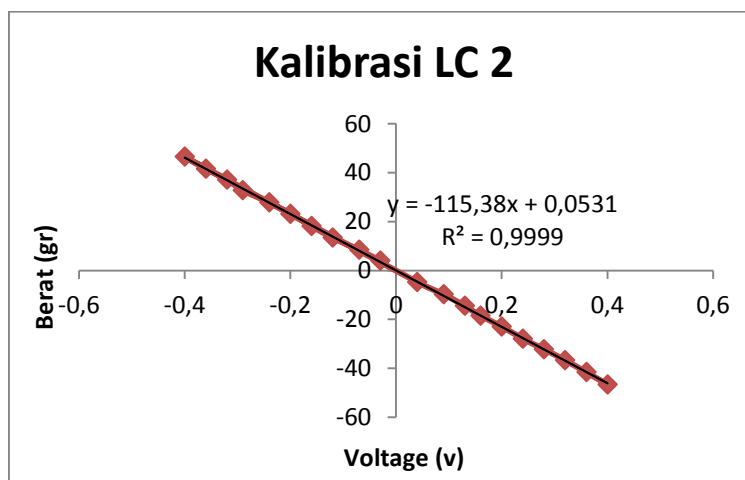
Untuk itu perlu dilakukan kalibrasi untuk mengetahui hubungan antara frekuensi kipas dengan kecepatan aliran di dalam seksi uji pada setiap model. Detail data kalibrasi *fan driver* dapat dilihat pada Lampiran B. Hasil kalibrasi untuk seluruh model dan variasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.6.

b. Kalibrasi *Load Cell*

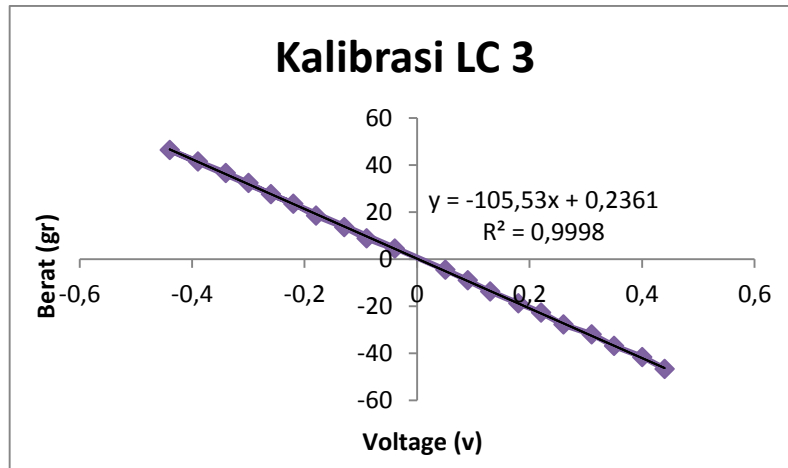
Pengujian gaya pada penelitian ini menggunakan loadcell sebagai sensor gaya langsung dimana ada 4 *load cell* yang dipasang di kedua ujung masing- masing model. *Load cell* yang digunakan adalah 3 buah *load cell* jenis S dengan kapasitas 25 lb (11,11 kg) dan 1 buah *load cell* jenis beam dengan kapasitas 10 kg.



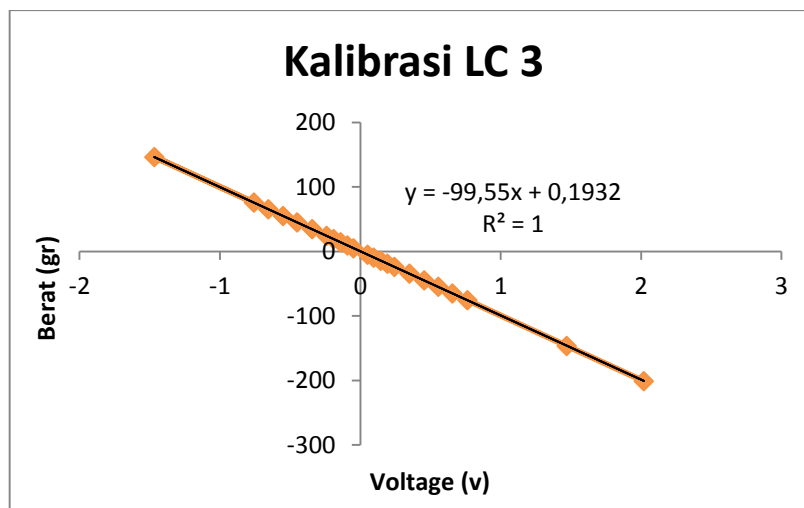
Gambar 3.7. Hasil Kalibrasi *Load Cell* S (LC1).



Gambar 3.8. Hasil Kalibrasi *Load Cell* S (LC2).



Gambar 3.9. Hasil Kalibrasi *Load Cell S* (LC3)



Gambar 3.10. Hasil Kalibrasi *Load Cell Beam* (LC4)

Proses kalibrasi dilakukan dengan cara mencocokkan bacaan sinyal load cell berupa voltase dengan berbagai variasi beban tertentu yang diberikan. Selanjutnya, proses regresi dilakukan terhadap variasi data tersebut. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada Gambar 3.7 - 3.10. Detail kalibrasi load cell dapat dilihat pada Lampiran C.

3.2.5 Tahap Validasi Model

Pada tahap ini dilakukan pengujian gaya drag untuk model silinder polos dan silinder helics dengan konfigurasi tunggal. Hal ini bertujuan untuk mencocokkan nilai C_D rata - rata dari silinder polos dan silinder helics tunggal

dengan hasil penelitian sebelumnya. Model dipasang di dalam seksi uji dengan tumpuan roll yang didesain khusus untuk pengujian gaya. Selanjutnya *loadcell* dipasang di kedua ujung model sedemikian rupa sehingga mampu mendeteksi gaya drag (lihat Gambar 3.11). Pengujian gaya drag dilakukan pada model dengan variasi kecepatan 5-20 m/s dengan selisih 1 m/s. Gambar pemasangan model pada tahap validasi ditunjukkan oleh Gambar 3.12.



Gambar 3.11. Posisi Pemasangan *Load Cell* untuk Pengujian Gaya Drag.



(a)



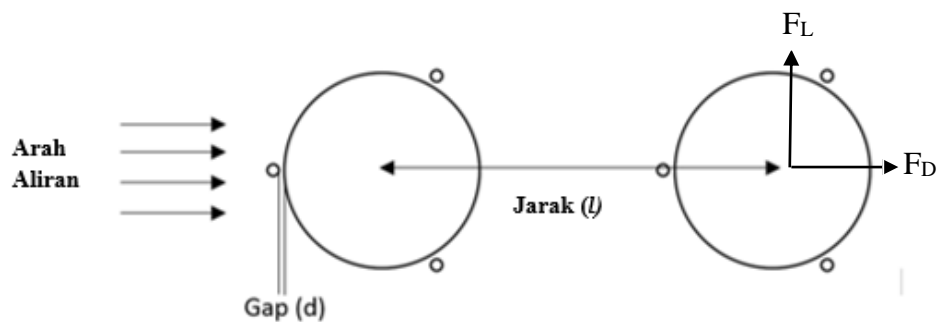
(b)

Gambar 3.12. Posisi Pemasangan Model Pengujian Tahap Validasi.

(a) Silinder Polos (b) Silinder Helics.

3.2.6 Tahap Eksperimen

Pada tahap ini dilakukan pengukuran properti gaya drag, gaya lift dan visualisasi aliran fluida untuk model silinder helics dengan konfigurasi *tandem*. Variasi jarak (l/D) diukur dari pusat lingkaran model (lihat Gambar 3.13). Variasi jarak yang digunakan pada pengujian tahap eksperimen ini adalah $1.75D$, $3D$ dan $5D$. Untuk pengujian gaya drag dan gaya lift, variasi kecepatan yang digunakan adalah pada kecepatan 5-20 m/s dengan selisih 1 m/s. Model dipasang sedemikian rupa sehingga posisi relatif helical rods kedua spesimen adalah sejajar (lihat Gambar 3.14). Load cell dipasang sedemikian rupa di keempat ujung silinder untuk mendeteksi besarnya gaya drag dan gaya lift yang terjadi (lihat Gambar 3.15, Gambar 3.16 dan Gambar 3.17).



Gambar 3.13. Variasi jarak (l/D) Konfigurasi Tandem.



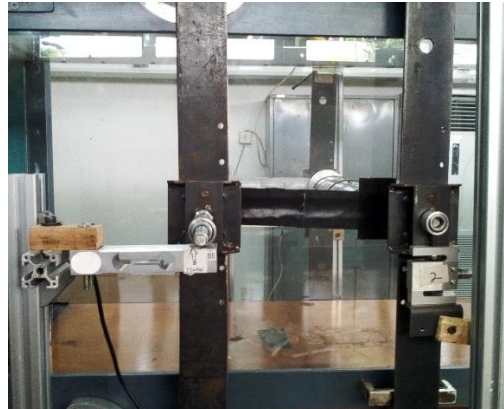
(a)

(b)

Gambar 3.14. Instalasi Model di dalam Seksi Uji.

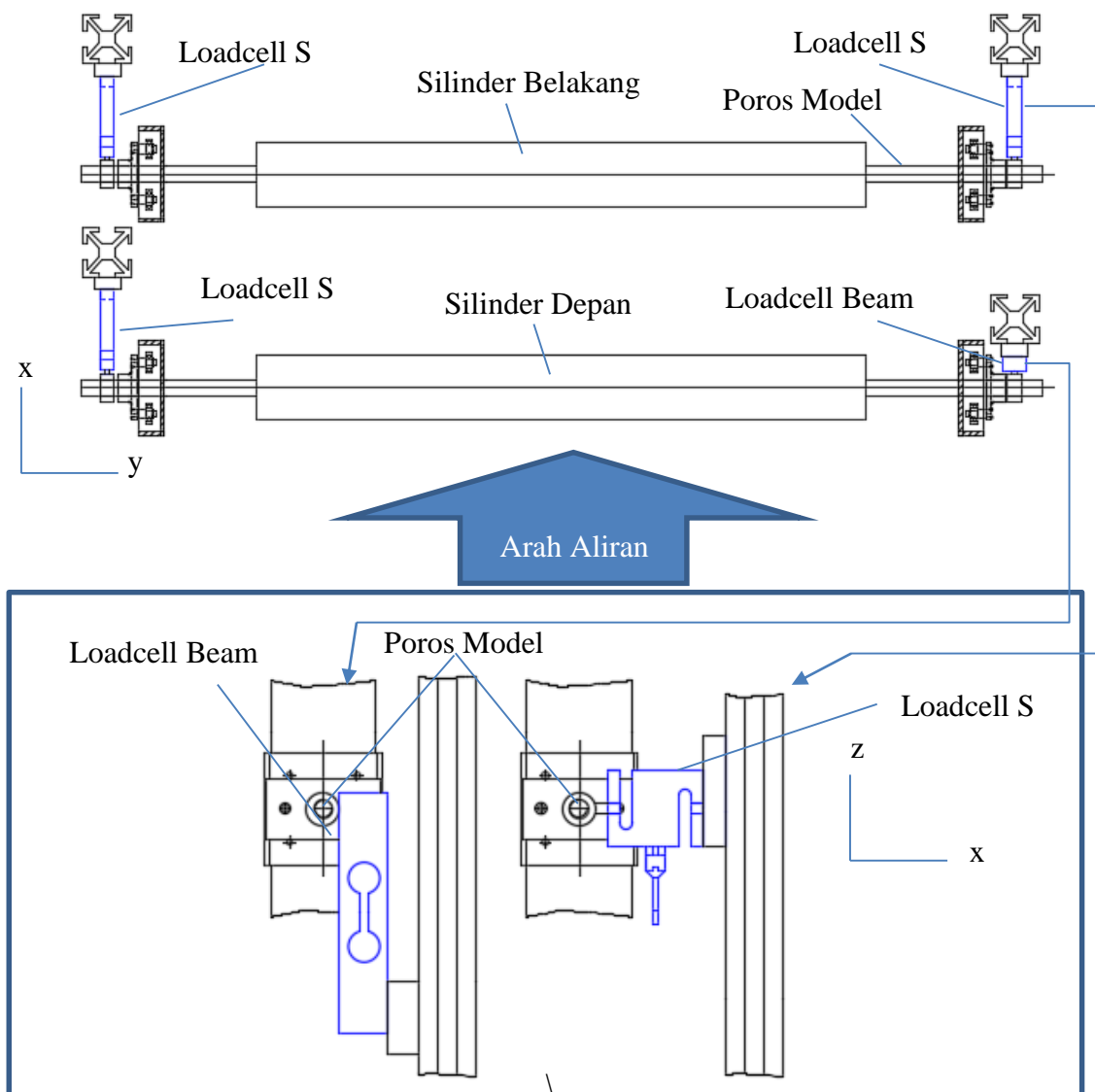


(a)

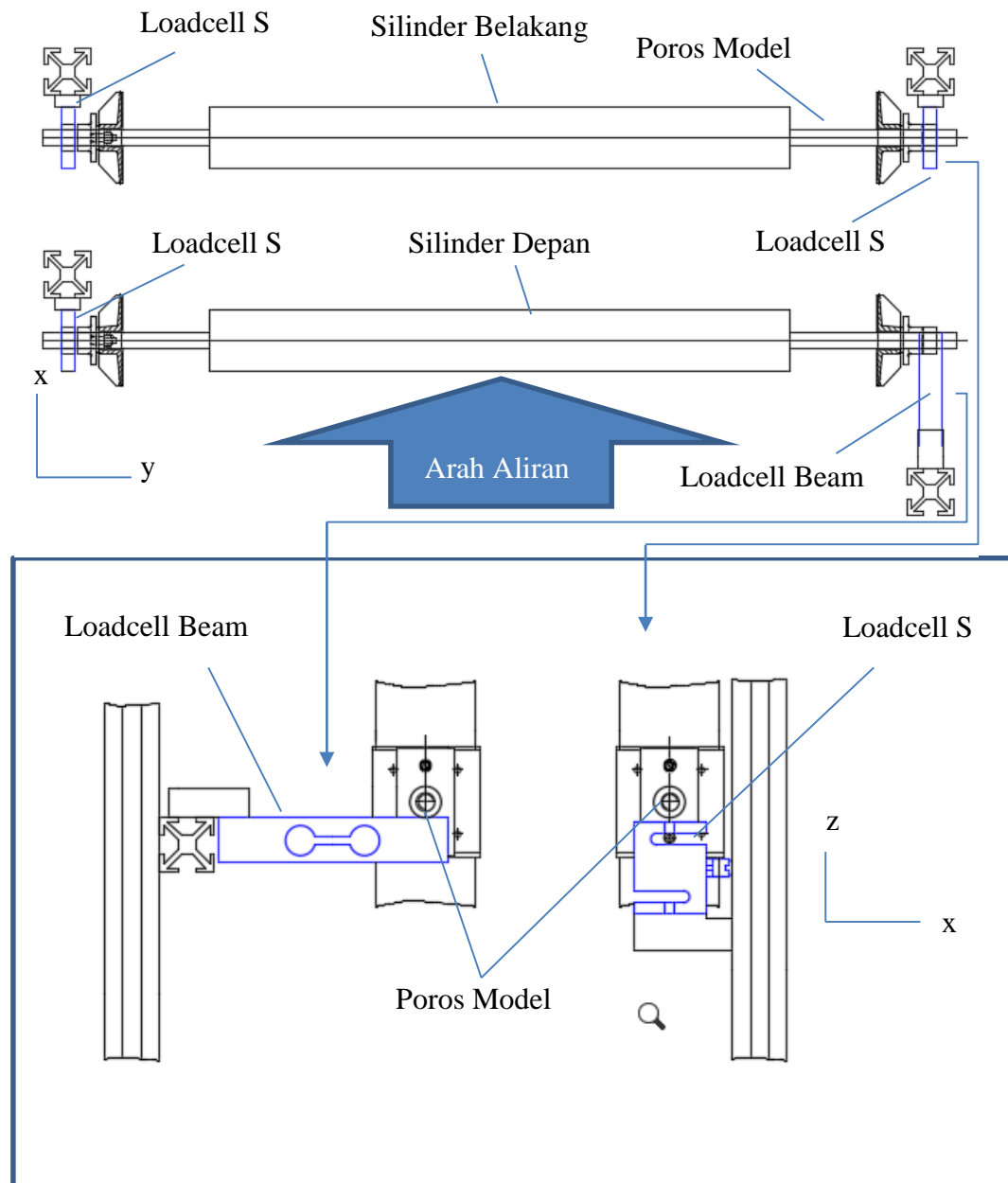


(b)

Gambar 3.15. Posisi Pemasangan *Load Cell* untuk Pengujian (a) Gaya Drag (b) Gaya Lift.



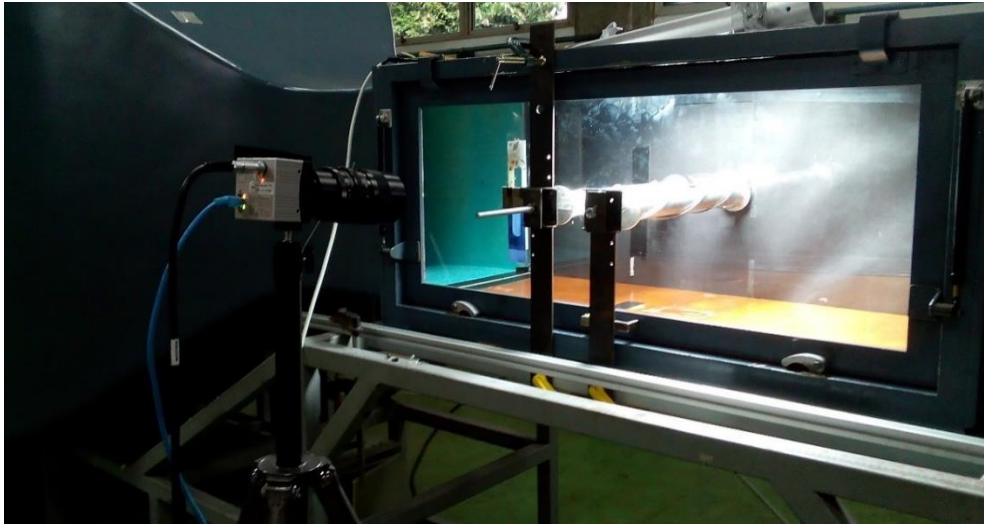
Gambar 3.16. Ilustrasi Pemasangan *Load Cell* untuk Pengujian Gaya Drag



Gambar 3.17. Ilustrasi Pemasangan *Load Cell* untuk Pengujian Gaya Lift

Untuk pengujian visualisasi aliran fluida, smoke generator digunakan untuk memberikan warna pada aliran udara yang masuk kedalam *wind tunnel*. Selanjutnya, pola aliran yang terbentuk pada proses pengujian direkam menggunakan kamera digital kecepatan tinggi. Kamera disetel pada kecepatan 300fps. Sebuah lampu LED 70 watt digunakan untuk membantu pencahayaan.

Variasi jarak yang digunakan adalah sama dengan variasi pada pengujian gaya. Sedangkan untuk kecepatan aliran menggunakan 5 m/s. Gambar 3.16 menunjukkan kondisi pengujian pada tahap eksperimen. Setting eksperimen pengujian visualisasi aliran fluida ditunjukkan oleh Gambar 3.18.



Gambar 3.18. Pengujian Visualisasi Aliran Fluida Silinder Helics Konfigurasi Tandem.

3.2.7 Hasil dan Pembahasan

Output yang diperoleh dari hasil pengujian adalah besarnya gaya drag, gaya lift pada spesimen dan pola aliran yang terbentuk disekitar spesimen untuk masing – masing kondisi variasi pengujian. Kemudian data gaya drag dan gaya lift ini diolah menjadi data koefisien drag rata - rata dan koefisien lift rata - rata. Data disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara *Reynolds Number* terhadap koefisien drag dan lift pada masing – masing kondisi pengujian. Output yang lain adalah berupa visualisasi aliran fluida yang terekam oleh kamera *high speed* yang disajikan dalam bentuk gambar.

3.2.8 Penarikan Kesimpulan

Setelah analisis hasil eksperimen diperoleh maka proses selanjutnya adalah penarikan kesimpulan dari keseluruhan kegiatan penelitian. Penarikan kesimpulan dilakukan dengan cara membandingkan hasil output pada setiap kondisi variasi pengujian maupun referensi terkait.

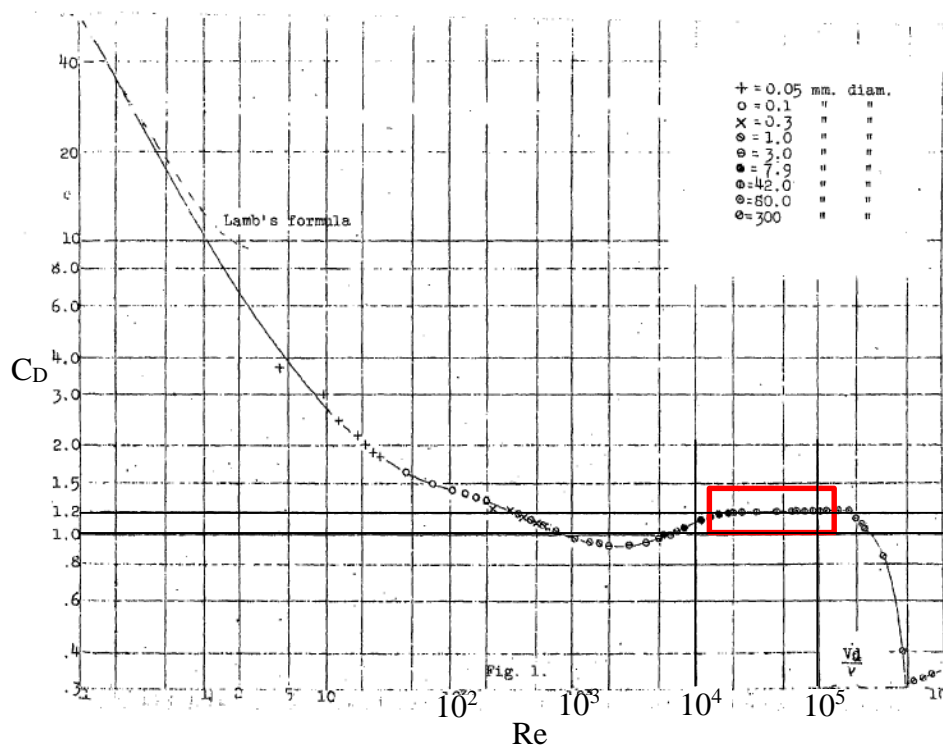
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Di dalam bab ini akan diuraikan hasil penelitian yang sudah dicapai. Hasil - hasil eksperimen yang disajikan adalah hasil validasi model, hasil pengukuran gaya drag dan gaya lift untuk semua kondisi pengujian dan visualisasi pola aliran dibelakang model untuk silinder polos, silinder dengan helical rods ber-gap tunggal (silinder helics) dan jamak (tandem). Detail perhitungan yang disajikan dalam bab ini dapat dilihat pada Lampiran D.

4.1 Validasi Model

Untuk menjamin keakuratan seluruh hasil pengujian, maka dilakukan pengukuran \bar{C}_D untuk kasus silinder polos dan silinder helics konfigurasi tunggal. Kemudian hasil dari pengujian tersebut dicocokkan dengan hasil penelitian sebelumnya. Data yang digunakan sebagai perbandingan adalah data milik Wieselberger (1922) yang ditunjukkan Gambar 4.1. Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan hasil pengujian \bar{C}_D silinder polos dengan data referensi oleh Wieselberger (1922).

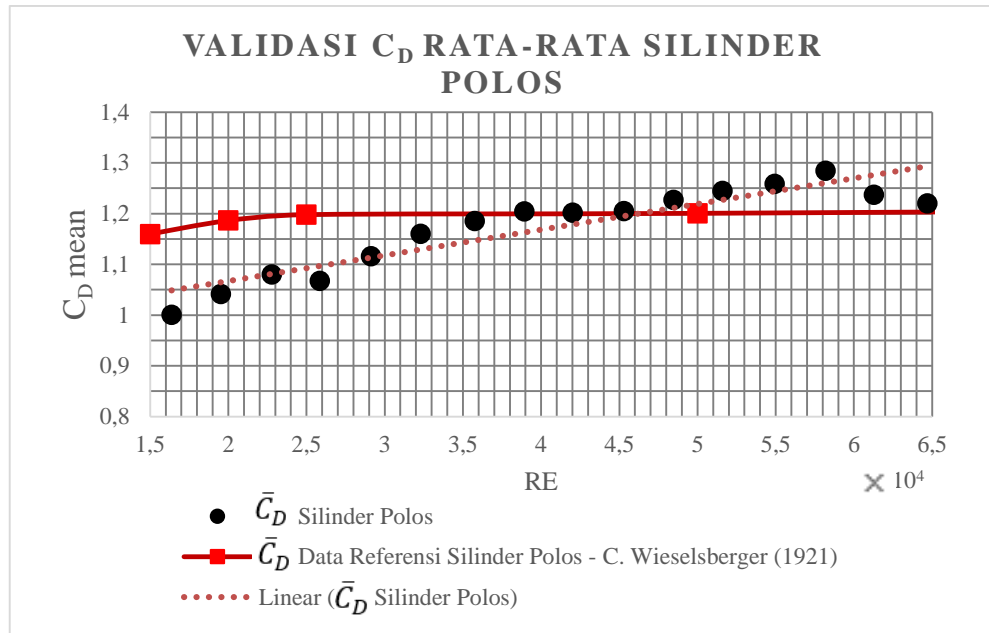


Gambar 4.1. \bar{C}_D Silinder Polos Konfigurasi Tunggal (Wieselberger, 1922).

Hasilnya adalah \bar{C}_D dari silinder polos secara umum memiliki kesesuaian data dan tren yang baik terhadap data referensi pada $Re > 2,9 \times 10^4$. Perbedaan terbesar terjadi pada $Re 1,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,2 atau sekitar 16,63% dari data referensi. Hal ini disebabkan karena belum stabilnya aliran fluida yang dibangkitkan oleh kipas pada frekuensi rendah. Selain itu juga disebabkan oleh tahanan tumpuan yang mengurangi sensitivitas loadcell.

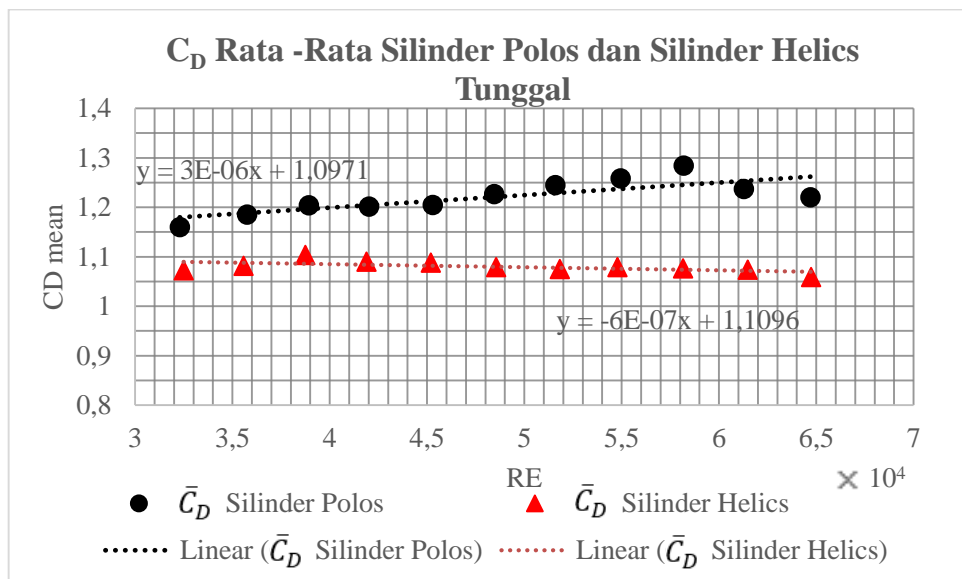
Tabel 4.1. Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan Referensi.

U (m/s)	U aktual (m/s)	Re	\bar{C}_D	\bar{C}_D Referensi Wieselberger	Selisih	Selisih (%)
5	5,02	16368,56	1,000	1,2	0,200	16,63
6	6,01	19526,71	1,042	1,2	0,158	13,19
7	7,02	22781,12	1,080	1,2	0,120	10,02
8	7,97	25851,24	1,067	1,2	0,133	11,07
9	8,99	29133,63	1,116	1,2	0,084	7,02
10	9,97	32299,97	1,169	1,2	0,040	3,34
11	11,04	35759,33	1,185	1,2	0,015	1,23
12	12,02	38933,62	1,204	1,2	0,004	0,33
13	12,99	42021,39	1,201	1,2	0,001	0,12
14	13,99	45287,69	1,205	1,2	0,005	0,39
15	14,98	48458,85	1,227	1,2	0,027	2,22
16	15,95	51591,56	1,244	1,2	0,044	3,71
17	17,01	54943,99	1,258	1,2	0,058	4,87
18	18,00	58182,10	1,284	1,2	0,084	7,02
19	18,97	61281,10	1,237	1,2	0,037	3,09
20	20,03	64698,89	1,220	1,2	0,020	1,66



Gambar 4.2. Grafik Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Referensi.

Kemudian hasil pengujian gaya drag untuk silinder helics konfigurasi tunggal dibandingkan dengan hasil pengujian gaya drag untuk silinder polos pada rentang angka Reynolds yang memiliki kesesuaian data cukup baik terhadap referensi ($Re \geq 3,2 \times 10^4$). Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.3.



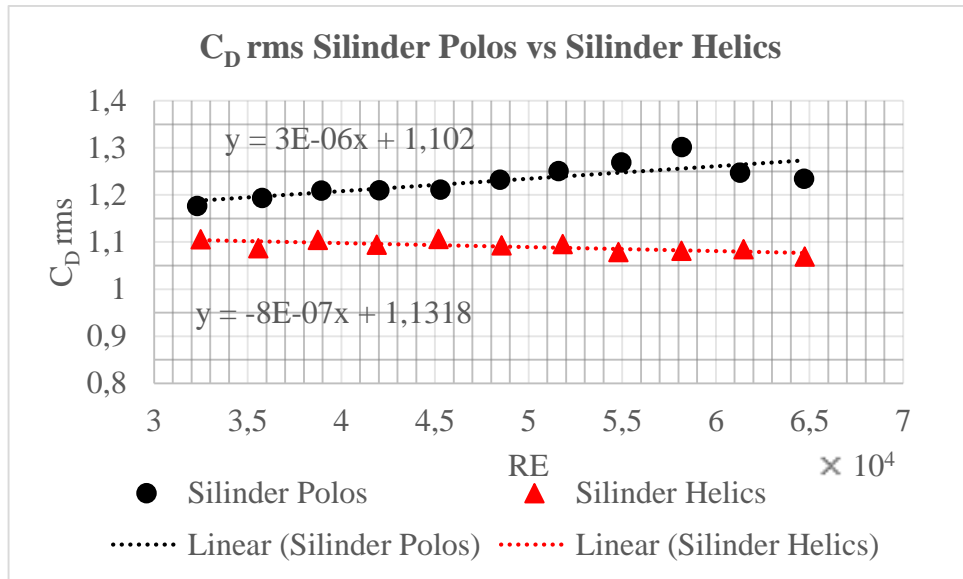
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Silinder Helics Tunggal.

Hasilnya adalah \bar{C}_D dari silinder helics selalu berada di bawah \bar{C}_D silinder polos atau mengalami reduksi akibat pemasangan *triple helical rods* ber-gap sesuai dengan penelitian Al-Musthofa (2014). Reduksi terbesar terjadi pada $Re\ 5,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,208 atau sekitar 16,2% dibandingkan silinder polos dan reduksi terkecil terjadi pada $Re\ 3,2 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,087 atau sekitar 7,52% dibandingkan silinder polos.

Tabel 4.2 Perbandingan \bar{C}_D Silinder Polos dengan \bar{C}_D Silinder Helics Tunggal.

Silinder Polos			Silinder Helics			CD	CD	Selisih	Selisih
U (m/s)	U actual (m/s)	RE	U (m/s)	U actual (m/s)	RE	Silinder Polos	Silinder Helics		%
10	9,97	32300	10	10,03	32494	1,160	1,073	0,087	7,52
11	11,04	35759	11	10,98	35565	1,185	1,081	0,104	8,76
12	12,02	38934	12	11,96	38739	1,204	1,104	0,100	8,32
13	12,99	42021	13	12,95	41892	1,201	1,090	0,112	9,30
14	13,99	45288	14	13,96	45191	1,205	1,088	0,117	9,68
15	14,98	48459	15	15,01	48556	1,227	1,079	0,148	12,05
16	15,95	51592	16	16,02	51818	1,244	1,075	0,169	13,59
17	17,01	54944	17	16,96	54782	1,258	1,079	0,179	14,24
18	18,00	58182	18	17,99	58150	1,284	1,076	0,208	16,20
19	18,97	61281	19	19,03	61475	1,237	1,074	0,164	13,22
20	20,03	64699	20	20,04	64731	1,220	1,059	0,161	13,19

Sedangkan untuk hasil perhitungan C_{Drms} sebagai komponen osilasi drag ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.4. C_{Drms} dari silinder helics berada di bawah C_{Drms} silinder polos pada angka $Re \geq 3,2 \times 10^4$. Atau dapat disimpulkan bahwa pada angka Reynolds yang tervalidasi baik ($Re \geq 3,2 \times 10^4$) penggunaan helical rods ber-gap mampu meredam komponen gaya drag osilasi dari silinder seperti pada penelitian Sugiwanto (2013) dan Al-Musthofa (2014). Reduksi terbesar terjadi pada $Re\ 5,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,22 atau sekitar 16,91% dan reduksi terkecil terjadi pada $Re\ 3,2 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,071 atau sekitar 6,03% dibandingkan silinder polos. Oleh sebab itu, dapat dikatakan bahwa secara umum setting dan model memiliki validasi yang cukup baik pada rentang $Re \geq 3,2 \times 10^4$.



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan C_{Drms} Silinder Polos dengan C_{Drms} Silinder Helics Tunggal.

Tabel 4.3 Perbandingan C_{Drms} Silinder Polos dengan C_{Drms} Silinder Helics Tunggal.

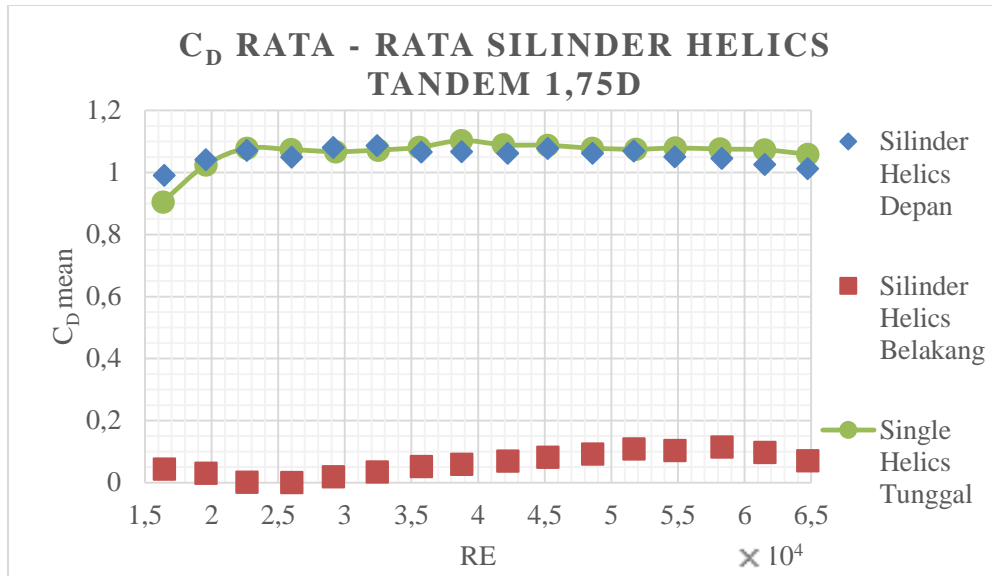
Silinder Polos			Silinder Helics			C_{Drms}	C_{Drms}	Selisih	Selisih
U (m/s)	U actual (m/s)	RE	U (m/s)	U actual (m/s)	RE	Silinder Polos	Silinder Helics		%
10	9,97	32300	10	10,03	32494	1,177	1,106	0,071	6,03
11	11,04	35759	11	10,98	35565	1,194	1,087	0,107	8,97
12	12,02	38934	12	11,96	38739	1,209	1,104	0,105	8,65
13	12,99	42021	13	12,95	41892	1,210	1,094	0,115	9,55
14	13,99	45288	14	13,96	45191	1,211	1,106	0,105	8,67
15	14,98	48459	15	15,01	48556	1,233	1,093	0,140	11,35
16	15,95	51592	16	16,02	51818	1,251	1,096	0,155	12,40
17	17,01	54944	17	16,96	54782	1,269	1,078	0,191	15,02
18	18,00	58182	18	17,99	58150	1,302	1,082	0,220	16,91
19	18,97	61281	19	19,03	61475	1,247	1,085	0,163	13,03
20	20,03	64699	20	20,04	64731	1,234	1,069	0,165	13,37

4.2 Hasil Pengujian Gaya Drag Konfigurasi Tandem

4.2.1 Koefisien Drag Rata - Rata

Pengujian koefisien *drag* untuk konfigurasi *tandem* dilakukan pada 3 variasi jarak (l/D) yaitu; 1,75D, 3D dan 5D. Pengujian \bar{C}_D pada konfigurasi *tandem*

menunjukkan pengaruh interferensi yang kuat berupa efek *shielding* pada silinder belakang di seluruh Re dan variasi l/D . Efek *shielding* ini menyebabkan turunnya \bar{C}_D silinder belakang secara signifikan karena terhalangnya suplai aliran oleh silinder depan. Hasil pengujian \bar{C}_D untuk konfigurasi *tandem* dapat dilihat pada Gambar 4.5, Gambar 4.6, Gambar 4.7.

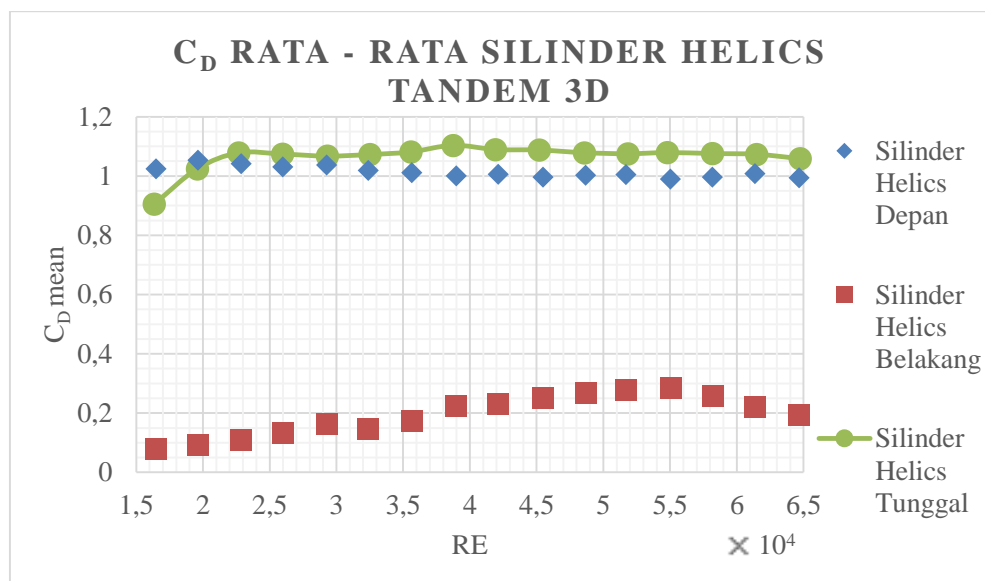


Gambar 4.5. \bar{C}_D Konfigurasi *Tandem* 1,75D.

Gambar 4.5 menunjukkan plot grafik koefisien drag rata - rata untuk konfigurasi tandem dengan jarak 1,75D. Pada jarak ini, grafik koefisien drag rata - rata untuk silinder depan secara umum memiliki tren yang mirip dengan grafik koefisien drag silinder helics pada konfigurasi tunggal di seluruh angka Reynolds. Meski begitu, pada silinder depan ada perbedaan nilai di beberapa titik angka Reynolds. Perubahan terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ dengan peningkatan sebesar 0,085 atau sekitar 9,4% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan pada silinder belakang, koefisien drag (\bar{C}_D) menurun drastis mendekati nilai nol. Hal ini terjadi akibat pengaruh efek *shielding*. Penurunan koefisien drag (\bar{C}_D) terbesar terjadi pada angka Reynolds $2,3 \times 10^4$ yaitu sebesar 99,8% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal.

Gambar 4.6 menunjukkan plot grafik koefisien drag konfigurasi tandem pada variasi jarak 3D. Pada jarak ini, grafik koefisien drag untuk silinder depan secara umum memiliki nilai yang cenderung lebih stabil di seluruh angka Reynolds

dan memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal untuk angka Reynolds diatas $1,96 \times 10^4$. Perubahan terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ dengan peningkatan sebesar 13.1% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk penurunan terbesar terjadi pada angka Reynolds $3,9 \times 10^4$ yaitu sebesar 9,4%. Pada silinder belakang, koefisien drag rata -rata (\bar{C}_D) masih relatif rendah dibandingkan silinder helics konfigurasi tunggal. Penurunan koefisien drag rata- rata (\bar{C}_D) terbesar terjadi pada angka Reynolds $2,3 \times 10^4$ yaitu sebesar 97% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal.

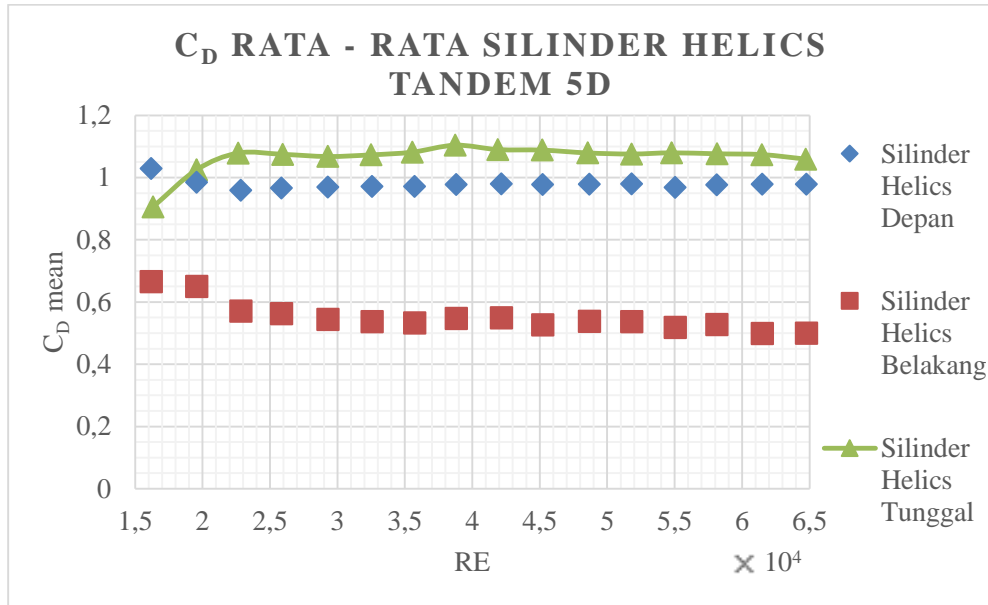


Gambar 4.6. \bar{C}_D Konfigurasi *Tandem* 3D.

Gambar 4.7 menunjukkan plot grafik koefisien drag rata - rata untuk konfigurasi tandem dengan jarak 5D. Pada jarak ini, perubahan koefisien drag terbesar untuk silinder depan terjadi pada angka Reynolds $3,9 \times 10^4$ dengan penurunan sebesar 0,13 atau sekitar 11,4% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk peningkatan terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 13,6%.

Pada silinder belakang, koefisien drag rata -rata (\bar{C}_D) di seluruh angka Reynolds masih lebih kecil dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal. Penurunan koefisien drag rata – rata (\bar{C}_D) terbesar terjadi pada angka

Reynolds $6,1 \times 10^4$ yaitu sebesar 53,5% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal.



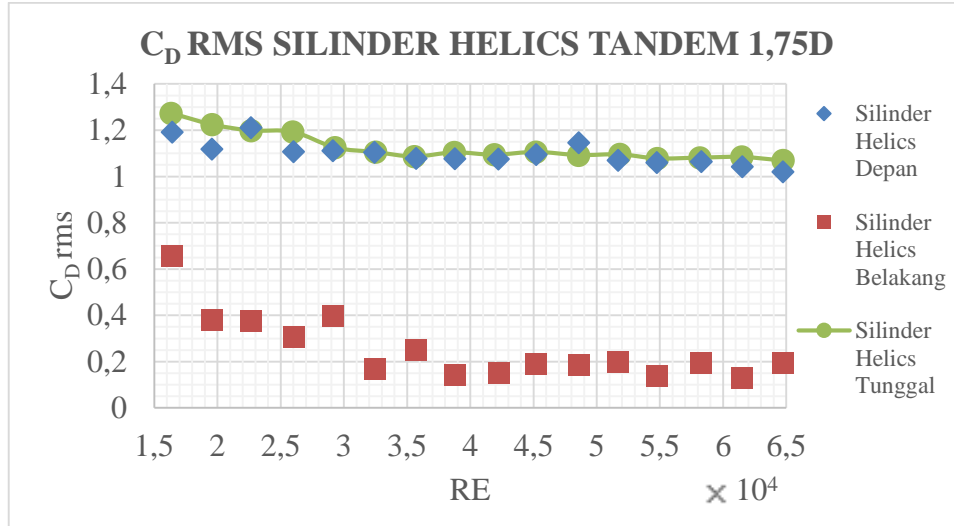
Gambar 4.7. \bar{C}_D Konfigurasi Tandem 5D.

4.2.2 Koefisien Drag Root Mean Square

Komponen osilasi drag diwakili oleh nilai root mean square dari seluruh data pengujian gaya drag yang diubah kedalam C_{Drms} . Hasil pengujian C_{Drms} dapat dilihat pada Gambar 4.8, Gambar 4.10, Gambar 4.11.

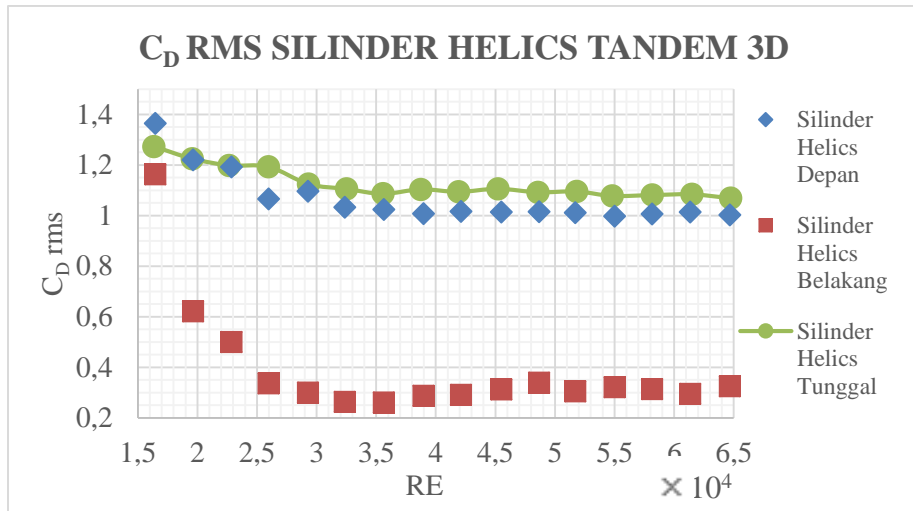
Gambar 4.8 menunjukkan plot grafik C_{Drms} konfigurasi tandem dengan jarak 1,75D. Pada jarak ini, grafik C_{Drms} untuk silinder depan secara umum memiliki tren yang mirip dengan grafik koefisien drag silinder pada konfigurasi tunggal di seluruh angka Reynolds. Hal ini sama dengan yang terjadi pada \bar{C}_D yang menunjukkan kesamaan tren dengan silinder helics konfigurasi tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa komponen osilasi tidak berubah signifikan dengan adanya interferensi dari silinder belakang. Meski begitu, pada silinder depan ada perbedaan nilai di beberapa titik angka Reynolds. Perubahan terbesar terjadi pada angka Reynolds 2×10^4 dengan penurunan sebesar 8,73% dibandingkan dengan C_{Drms} silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan pada silinder belakang, C_{Drms} menunjukkan nilai tidak sama dengan nol. Hal ini berbeda jika dibandingkan dengan karakteristik dari \bar{C}_D dimana nilainya berada pada sekitar angka nol. Pada

konfigurasi ini, komponen osilasi drag berperan lebih besar pada silinder belakang. Jika dibandingkan dengan silinder helics konfigurasi tunggal, terjadi penurunan C_{Drms} terbesar pada angka Reynolds $3,9 \times 10^4$ yaitu sebesar 86,9%.



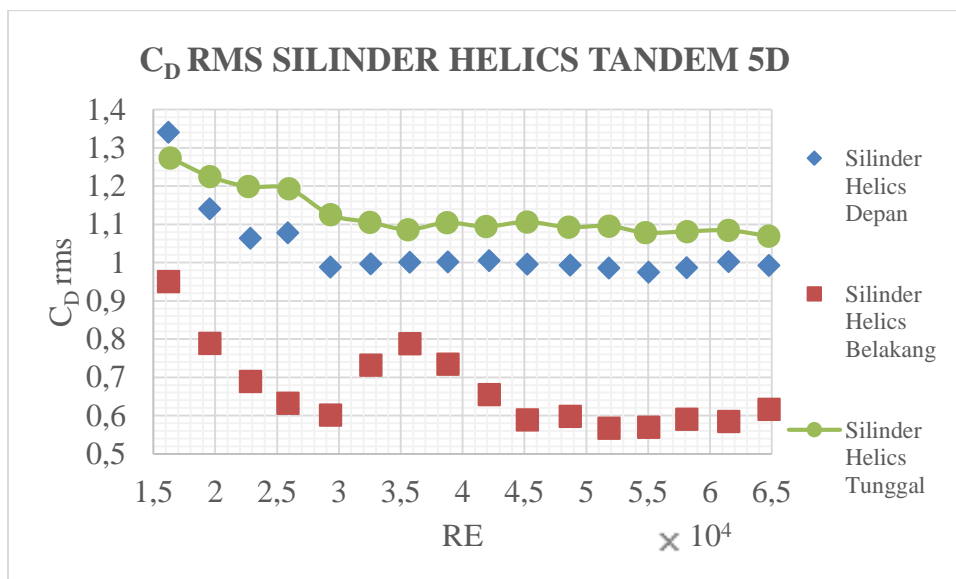
Gambar 4.8. C_{Drms} Konfigurasi *Tandem* 1,75D.

Gambar 4.9 menunjukkan plot grafik C_{Drms} konfigurasi tandem pada variasi jarak 3D. Pada jarak ini, grafik C_{Drms} untuk silinder depan secara umum memiliki nilai yang cenderung lebih stabil di seluruh angka Reynolds dan memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan C_{Drms} silinder helics konfigurasi tunggal untuk angka Reynolds diatas $1,6 \times 10^4$. Perubahan C_{Drms} terbesar untuk silinder depan terjadi pada angka Re $2,9 \times 10^4$ berupa penurunan sebesar 10,7% dibandingkan C_{Drms} untuk silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang, perubahan terbesar terjadi pada angka Re $2,9 \times 10^4$ dengan penurunan sebesar 71,8% dibandingkan dengan C_{Drms} silinder konfigurasi tunggal. C_{Drms} terbesar untuk silinder belakang terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 1,16. Nilai ini memiliki selisih 8,7% dibandingkan dengan C_{Drms} silinder helics konfigurasi tunggal.



Gambar 4.9. $C_{D\text{rms}}$ Konfigurasi Tandem 3D.

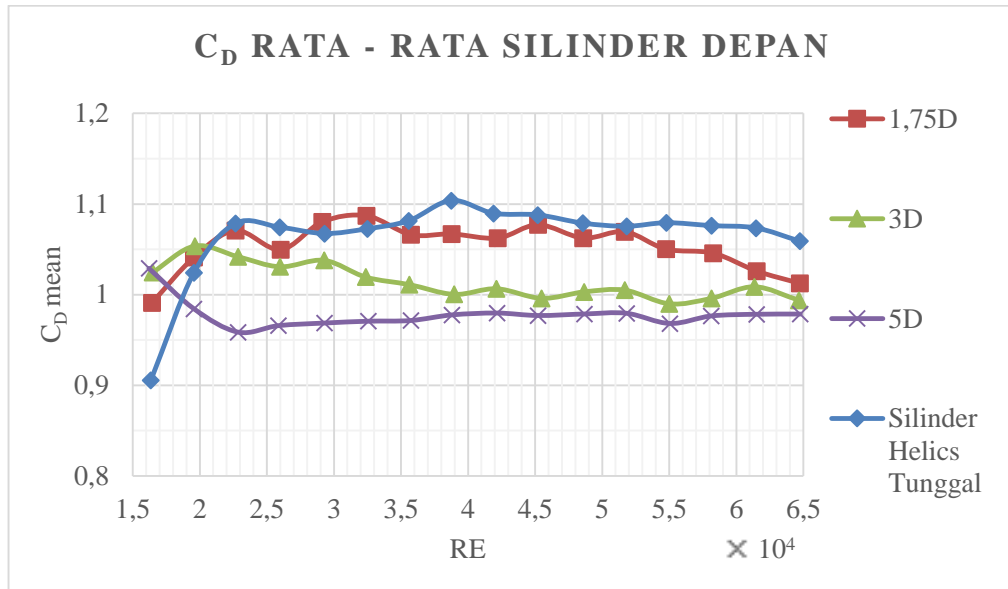
Gambar 4.10 menunjukkan plot grafik $C_{D\text{rms}}$ untuk konfigurasi tandem dengan jarak 5D. Pada jarak ini, perubahan $C_{D\text{rms}}$ terbesar terjadi pada angka Re $2,9 \times 10^4$ dengan penurunan sebesar 12,15% dibandingkan dengan $C_{D\text{rms}}$ silinder helics konfigurasi tunggal. Pada silinder belakang, $C_{D\text{rms}}$ di seluruh angka Reynolds masih lebih kecil dibandingkan dengan $C_{D\text{rms}}$ silinder helics konfigurasi tunggal. Penurunan $C_{D\text{rms}}$ terbesar terjadi pada angka Reynolds $2,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 47% dibandingkan dengan $C_{D\text{rms}}$ silinder helics konfigurasi tunggal.



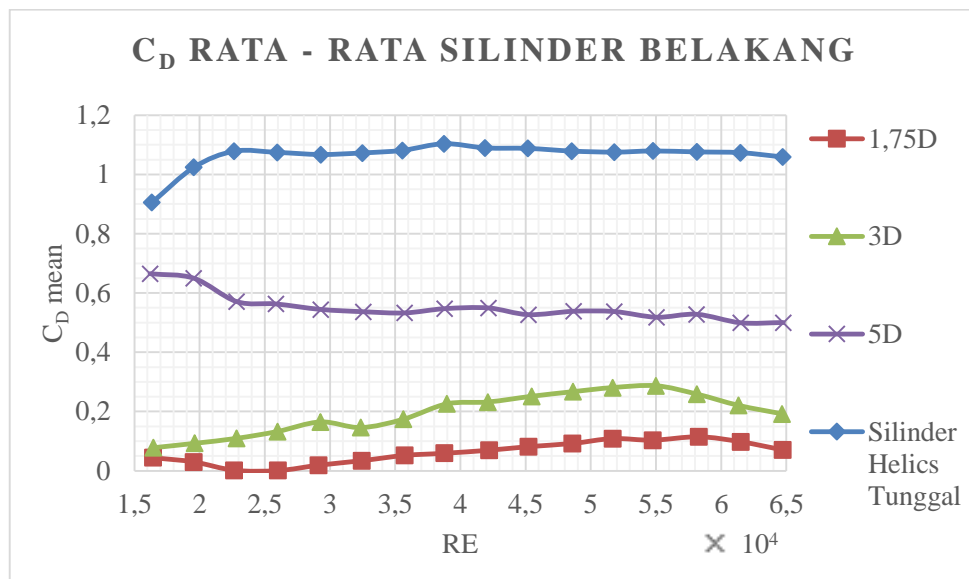
Gambar 4.10. $C_{D\text{rms}}$ Konfigurasi Tandem 5D.

4.2.3 Pengaruh Variasi Jarak terhadap \bar{C}_D dan C_{Drms}

Untuk melihat pengaruh jarak terhadap perubahan \bar{C}_D dan C_{Drms} maka hasil dari pengujian koefisien drag untuk silinder depan dan silinder belakang pada setiap variasi jarak di plot dalam satu grafik (Gambar 4.11 – Gambar 4.14).



Gambar 4.11. \bar{C}_D Silinder Depan Konfigurasi *Tandem*.

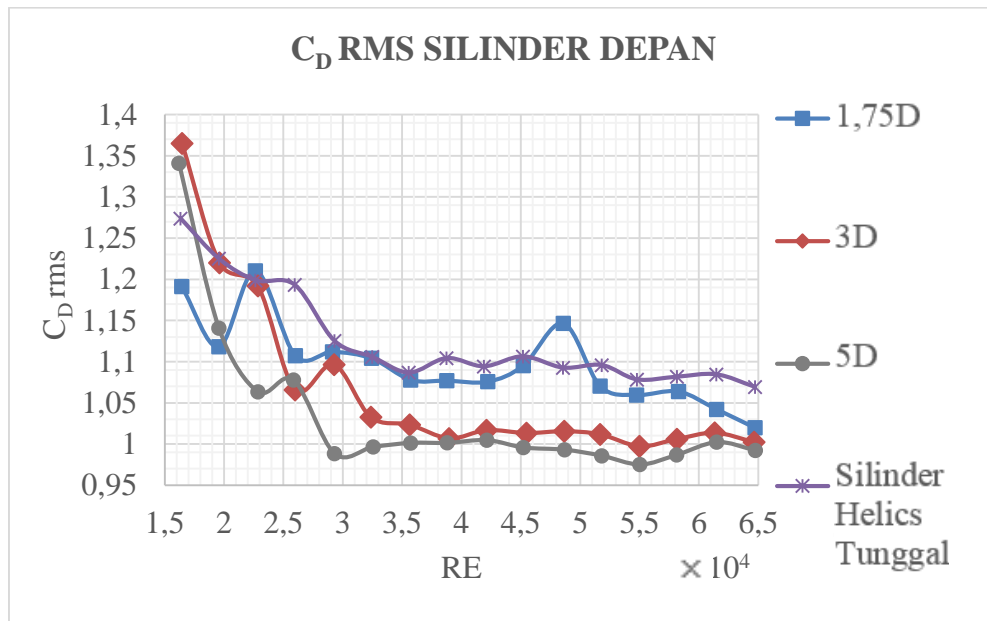


Gambar 4.12. \bar{C}_D Silinder Belakang Konfigurasi *Tandem*.

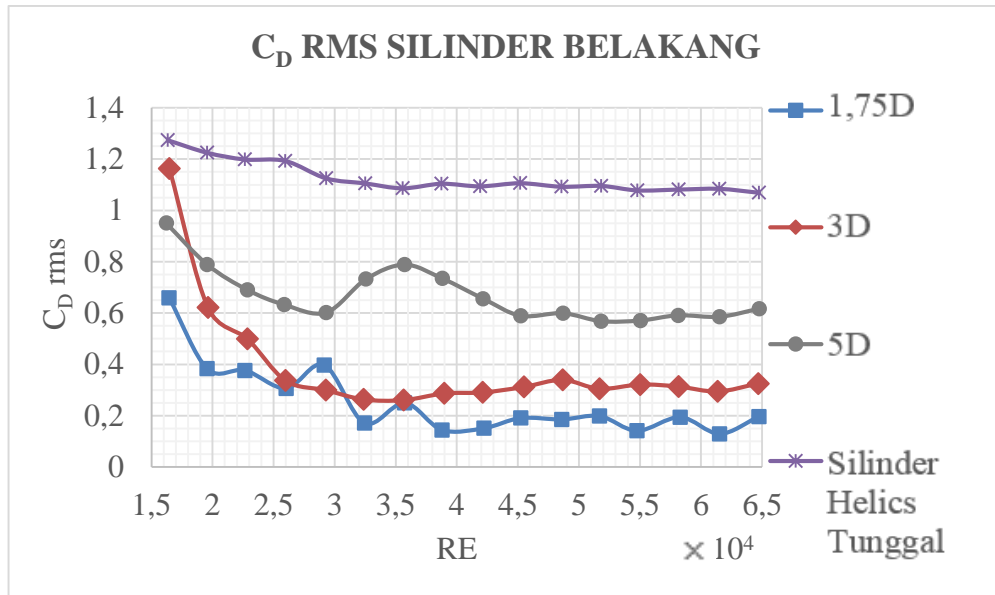
Secara umum, koefisien gaya *drag* rata – rata (\bar{C}_D) untuk silinder depan akan menurun seiring dengan bertambahnya jarak l/D pada angka Reynolds diatas 2×10^4 . Sebaliknya, koefisien gaya *drag* rata – rata (\bar{C}_D) untuk silinder belakang

mendapatkan pengaruh dari *shielding effect* sehingga koefisien gaya *drag* pada jarak 1,75D di seluruh angka Reynolds memiliki nilai terendah. Nilai ini kemudian meningkat seiring dengan bertambahnya jarak l/D . Ketiga variasi jarak masih menunjukkan tanda – tanda interferensi oleh masing – masing silinder terhadap koefisien *drag* rata – rata (Gambar 4.11 dan Gambar 4.12).

Sedangkan untuk koefisien drag *root mean square*, secara umum C_{Drms} untuk silinder depan akan menurun seiring dengan bertambahnya jarak l/D di beberapa angka Reynolds. Perbedaan tren terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$; $1,9 \times 10^4$; $2,6 \times 10^4$. Terjadi penurunan C_{Drms} terbesar pada silinder depan untuk konfigurasi 5D pada angka Reynolds $2,9 \times 10^4$ jika dibandingkan dengan silinder helics konfigurasi tunggal sebesar 0,14 atau sekitar 12,15%. Untuk silinder belakang, tren peningkatan C_{Drms} terhadap perubahan l/D masih terjadi akibat besarnya pengaruh *shielding effect*. Akan tetapi pada konfigurasi 1,75D, komponen osilasi drag berperan lebih besar sehingga koefisien drag rms tidak bernilai nol. Ketiga variasi jarak masih menunjukkan tanda – tanda interferensi oleh masing – masing silinder terhadap koefisien *drag* rms (Gambar 4.13 dan Gambar 4.14).

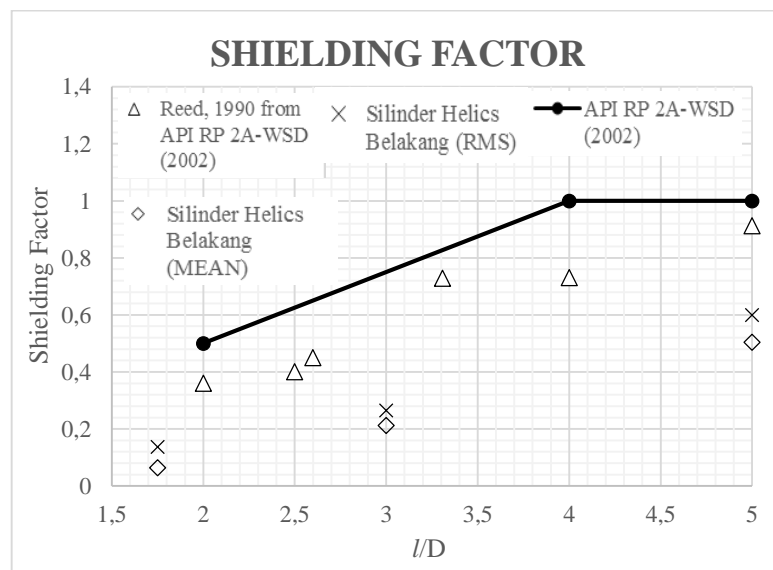


Gambar 4.13. C_{Drms} Silinder Depan Konfigurasi *Tandem*.



Gambar 4.14. C_{Drms} Silinder Belakang Konfigurasi Tandem.

Shielding factor untuk angka Re tervalidasi baik ($Re\ 4,2 \times 10^4$) ditunjukkan pada Gambar 4.15. Shielding factor dihitung dengan membandingkan C_D silinder helics belakang konfigurasi tandem dengan C_D silinder helics tunggal. Jika dibandingkan dengan data API RP 2A-WSD (2002), shielding factor untuk silinder belakang memiliki nilai yang lebih kecil di seluruh variasi l/D . Untuk hasil perhitungan shielding factor ditunjukkan oleh Tabel 4.4.



Gambar 4.15. *Shielding Factor* Silinder Belakang Dibandingkan API RP 2A-WSD (2002).

Tabel 4.4. *Shielding Factor* Silinder Belakang.

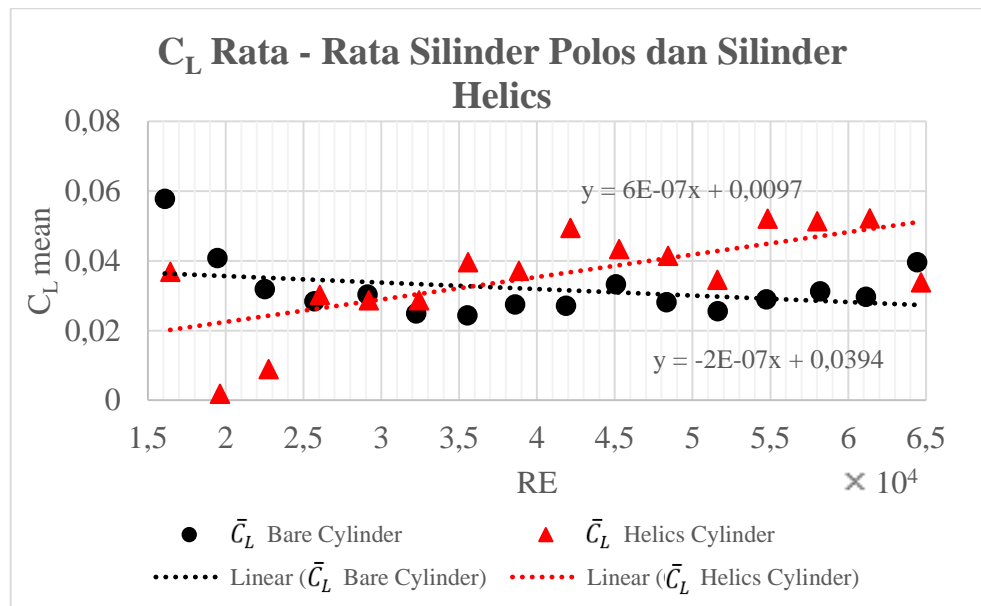
Re	SHIELDING FACTOR					
	1,75D		3D		5D	
	MEAN	RMS	MEAN	RMS	MEAN	RMS
1,6,E+04	0,049	0,518	0,086	0,913	0,735	0,746
2,0,E+04	0,030	0,313	0,091	0,507	0,635	0,644
2,3,E+04	0,002	0,314	0,102	0,417	0,529	0,576
2,6,E+04	0,001	0,257	0,124	0,282	0,524	0,530
2,9,E+04	0,018	0,353	0,154	0,266	0,510	0,535
3,2,E+04	0,032	0,155	0,136	0,238	0,500	0,662
3,6,E+04	0,048	0,230	0,161	0,240	0,493	0,726
3,9,E+04	0,054	0,131	0,205	0,260	0,496	0,665
4,2,E+04	0,064	0,138	0,213	0,265	0,504	0,599
4,5,E+04	0,075	0,172	0,231	0,282	0,484	0,532
4,8,E+04	0,086	0,169	0,247	0,311	0,499	0,548
5,2,E+04	0,101	0,181	0,261	0,278	0,500	0,518
5,5,E+04	0,096	0,131	0,266	0,298	0,480	0,529
5,8,E+04	0,107	0,179	0,240	0,290	0,491	0,546
6,1,E+04	0,091	0,119	0,205	0,271	0,465	0,539
6,5,E+04	0,067	0,184	0,182	0,304	0,472	0,577

4.3 Hasil Pengujian Gaya Lift Konfigurasi Tandem

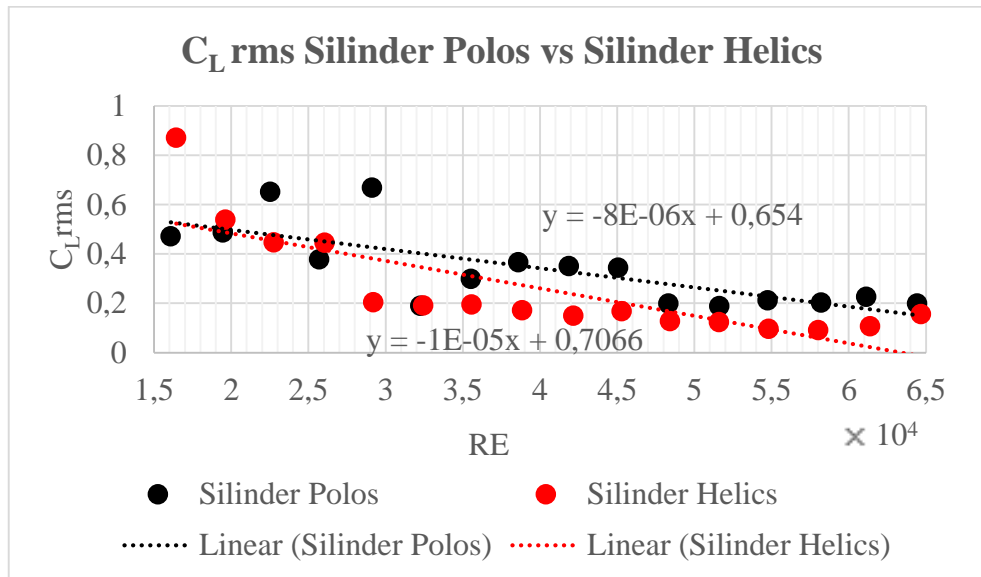
Menurut Sumer & Fredsoe (2006), koefisien lift rata – rata \bar{C}_L pada silinder polos adalah nol meski gaya lift osilasi tidak bernilai nol. Gambar 4.16 menunjukkan plot koefisien lift rata – rata (\bar{C}_L) pada silinder polos tunggal berbanding dengan \bar{C}_L pada silinder dengan helical rods bergap konfigurasi tunggal.

Dapat dilihat pada Gambar 4.16 bahwa \bar{C}_L pada silinder polos tidak bernilai nol mutlak. Walaupun begitu secara umum \bar{C}_L sangat rendah (dibawah 0,06) dan mendekati nilai nol. Hal ini mungkin disebabkan oleh *noise* (gangguan) yang bersifat alami pada loadcell yang sangat sensitif terhadap getaran. Grafik trendline pada kedua data berpotongan pada angka $Re\ 3,6 \times 10^4$. Pada $Re\ 1,6 \times 10^4 \sim 2,3 \times 10^4$, \bar{C}_L pada silinder helics lebih rendah daripada \bar{C}_L pada silinder polos. Penurunan \bar{C}_L terbesar pada rentang ini terjadi pada $Re\ 2 \times 10^4$ dengan penurunan sebesar 0,038 atau 95 %. Namun sebaliknya pada Re yang lebih tinggi ($Re\ 2,6 \times 10^4 \sim 6,4 \times 10^4$) \bar{C}_L pada silinder helics lebih tinggi daripada \bar{C}_L pada silinder polos. Pada

Rentang ini, kenaikan \bar{C}_L paling besar terjadi pada $Re\ 5,5 \times 10^4$ dengan kenaikan 80 %.



Gambar 4.16. Grafik Perbandingan \bar{C}_L Silinder Polos dengan \bar{C}_L Silinder Helics Tunggal.



Gambar 4.17. Perbandingan C_{Lrms} Silinder Polos dengan C_{Lrms} Silinder Helics Tunggal.

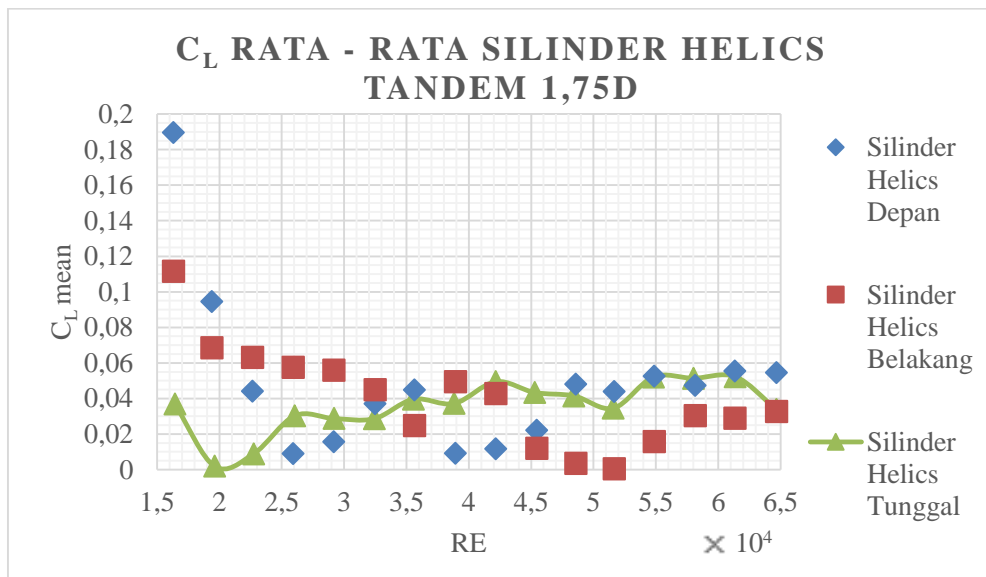
Sedangkan untuk C_{Lrms} grafik trendline silinder helics selalu berada dibawah silinder polos (Gambar 4.17). Sehingga dapat dikatakan penggunaan *triple*

helical rods ber-gap mampu meredam getaran vertikal atau C_{Lrms} sesuai dengan penelitian Sugiwanto (2013) dan Al-Musthofa (2014). Perubahan C_{Lrms} terbesar terjadi pada $Re\ 1,6 \times 10^4$ berupa penurunan sebesar 0,46 atau sekitar 69,3% dibandingkan kasus silinder polos.

4.3.1 Koefisien Lift Rata - Rata

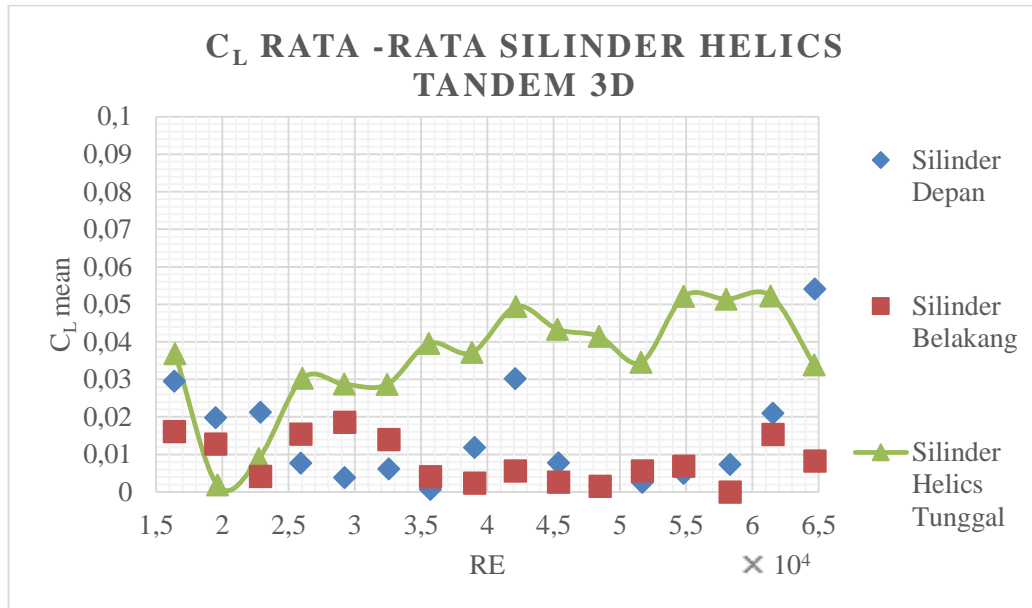
Pengujian koefisien gaya lift rata -rata (\bar{C}_L) untuk konfigurasi *tandem* dilakukan dengan 3 variasi jarak yaitu 1,75D, 3D dan 5D. Interferensi antar silinder berdampak pada perubahan koefisien gaya lift pada masing – masing silinder di seluruh variasi jarak dan angka Reynolds. Akan tetapi perubahan tidak signifikan karena hampir seluruh grafik berada pada kisaran angka nol. Hasil pengujian gaya lift dapat dilihat pada Gambar 4.18, Gambar 4.19 dan Gambar 4.20.

Pada Gambar 4.18 terlihat plot grafik koefisien lift rata -rata (\bar{C}_L) pengujian *tandem* untuk variasi jarak 1,75D. Pada jarak ini \bar{C}_L untuk silinder depan yang terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,19. Angka ini naik sebesar 4,1% dibandingkan \bar{C}_L untuk konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang, \bar{C}_L terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ sebesar 0,11. Jika dibandingkan dengan konfigurasi tunggal, \bar{C}_L pada angka Reynolds tersebut naik sebesar 2%.

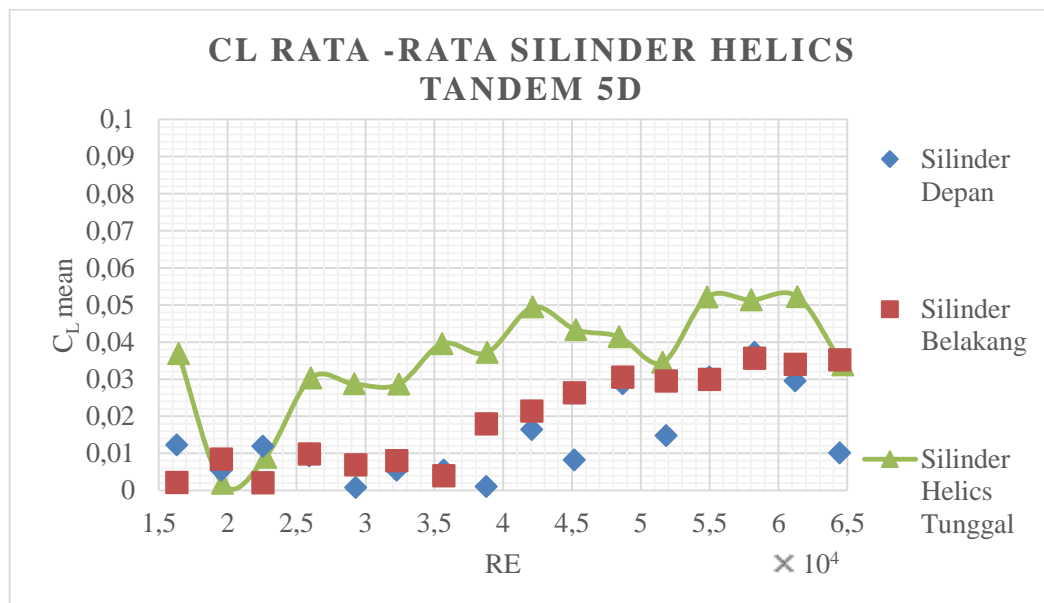


Gambar 4.18. \bar{C}_L Konfigurasi *Tandem* 1,75D.

Gambar 4.19 menunjukkan plot grafik koefisien lift rata-rata pengujian *tandem* untuk variasi jarak 3D. Pada jarak ini, \bar{C}_L terbesar untuk silinder depan terjadi pada angka Reynolds $6,5 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,05 atau turun 60% dibandingkan dengan silinder konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang, \bar{C}_L terbesar terjadi pada angka Reynolds $2,9 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,02 atau naik sebesar 35% jika dibandingkan dengan silinder konfigurasi tunggal.



Gambar 4.19. \bar{C}_L Konfigurasi Tandem 3D.

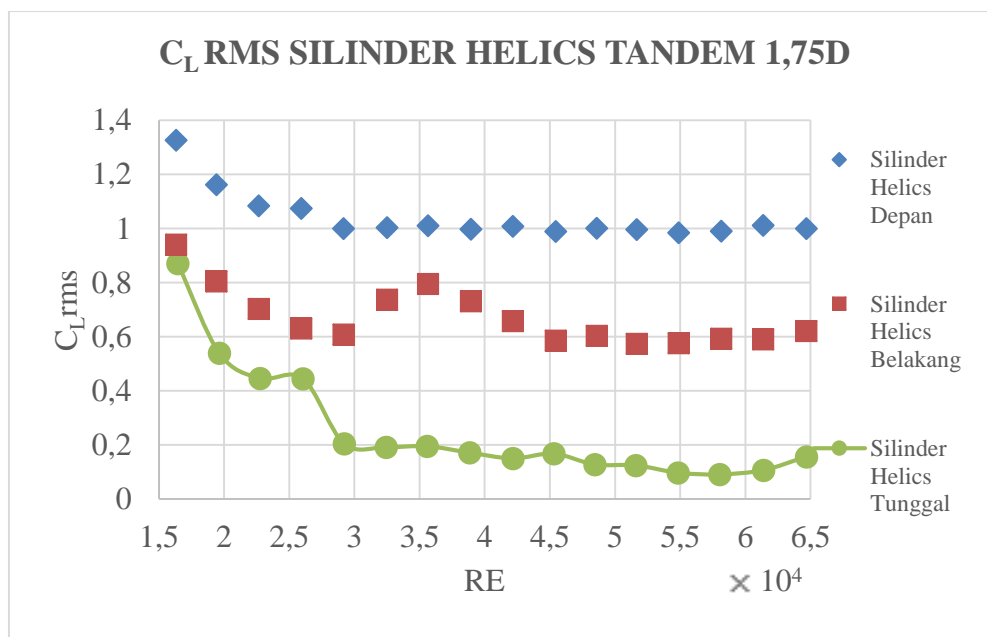


Gambar 4.20. \bar{C}_L Konfigurasi Tandem 5D.

Gambar 4.20 menunjukkan plot grafik koefisien lift rata-rata pengujian *tandem* untuk variasi jarak 5D. Pada jarak ini, \bar{C}_L terbesar untuk silinder depan terjadi pada angka Reynolds $5,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,037 atau turun naik sebesar 28% dibandingkan dengan silinder konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang, \bar{C}_L terbesar terjadi pada angka Reynolds $5,8 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,036 atau naik sebesar 30% jika dibandingkan dengan silinder konfigurasi tunggal.

4.3.2 Koefisien Lift *Root Mean Square*

Komponen lift osilasi merupakan komponen gaya yang terpengaruh langsung oleh perubahan vortex shedding. Pada pengujian C_{Lrms} menunjukkan bahwa komponen osilasi lift untuk silinder depan dan belakang memiliki perbedaan nilai yang kurang signifikan, khususnya untuk konfigurasi 3D dan 5D. Hasil pengujian C_{Lrms} untuk konfigurasi *tandem* dapat dilihat pada Gambar 4.21, Gambar 4.22, Gambar 4.23.

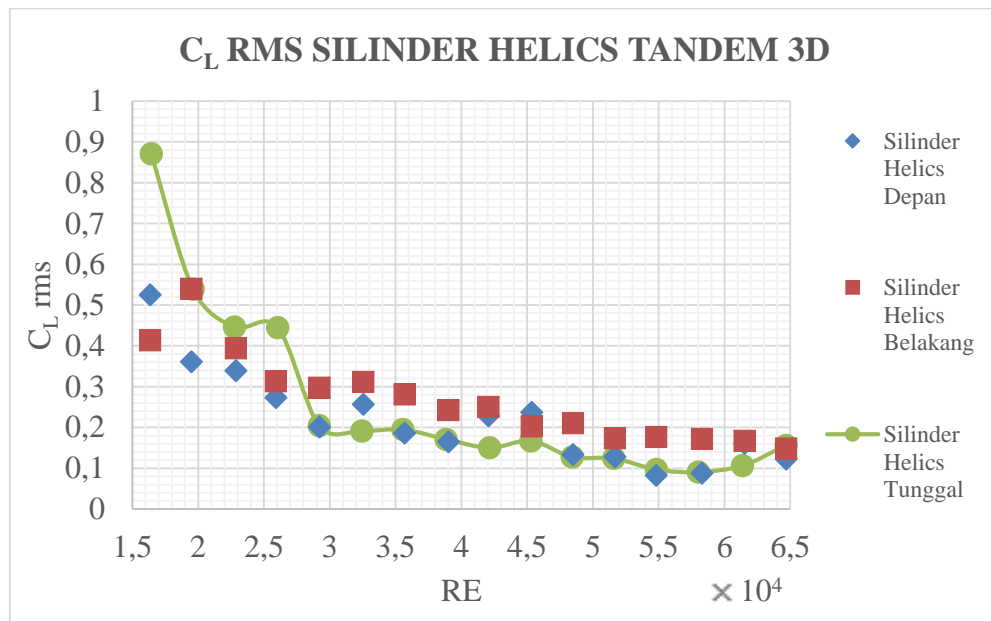


Gambar 4.21. C_{Lrms} Konfigurasi *Tandem* 1,75D.

Gambar 4.21 menunjukkan plot grafik koefisien drag rms konfigurasi tandem dengan jarak 1,75D. Pada jarak ini terjadi *shifting* C_{Lrms} pada silinder depan dan silinder belakang untuk semua angka Reynolds. C_{Lrms} untuk silinder depan naik drastis diseluruh angka Reynolds dan peningkatan terbesar terjadi pada

angka Reynolds $6,1 \times 10^4$ sebesar 0,9 dibandingkan dengan C_{Lrms} silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan pada silinder belakang, C_{Lrms} berada dibawah C_{Lrms} silinder depan. Jika dibandingkan dengan silinder helics konfigurasi tunggal, perubahan C_{Lrms} silinder belakang terbesar terjadi pada angka Reynolds $3,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 0,6.

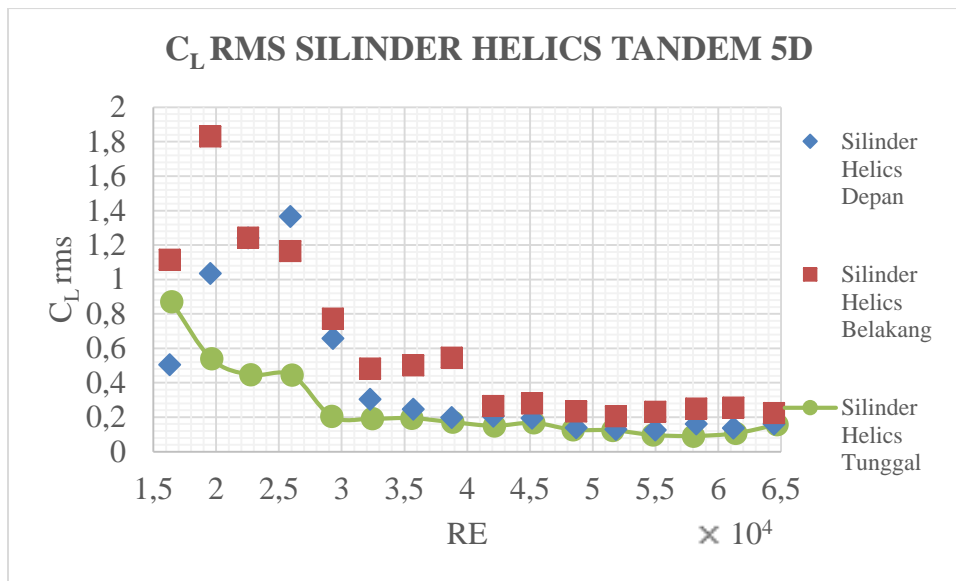
Gambar 4.22 menunjukkan plot grafik koefisien lift *root mean square* konfigurasi *tandem* pada variasi jarak 3D. Pada jarak ini, grafik C_{Lrms} untuk silinder depan secara umum memiliki nilai yang cenderung berada dibawah nilai C_{Lrms} silinder belakang pada beberapa titik angka Re. Akan tetapi kedua C_{Lrms} baik untuk silinder depan dan silinder belakang menunjukkan kemiripan tren, yaitu tren penurunan akibat penambahan angka Reynolds. C_{Lrms} untuk silinder depan dan silinder belakang tidak berada jauh dari silinder helics konfigurasi tunggal. Hal ini menunjukkan interferensi pada jarak 3D terhadap C_{Lrms} tidak terlalu signifikan.



Gambar 4.22. C_{Lrms} Konfigurasi *Tandem* 3D

Untuk silinder depan, perubahan terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ dengan peningkatan sebesar 0,35 atau sekitar 39,7% dibandingkan dengan C_{Lrms} silinder konfigurasi tunggal. Pada silinder belakang, perubahan C_{Lrms} terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$ yaitu sebesar 52,5% dibandingkan dengan C_{Lrms} silinder helics konfigurasi tunggal.

Gambar 4.23 menunjukkan plot grafik koefisien lift rms (C_{Lrms}) konfigurasi tandem dengan jarak 5D. Pada jarak ini, perubahan koefisien drag untuk silinder depan dan belakang memiliki nilai yang sangat besar pada angka Reynolds kecil. Untuk silinder depan, C_{Lrms} terbesar terjadi pada angka Reynolds $2,6 \times 10^4$ dengan dengan nilai 1,36 atau naik sebesar 0,92 dibandingkan dengan C_{Lrms} silinder helics kondisi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang C_{Lrms} terbesar terjadi pada angka Reynolds $1,9 \times 10^4$ yaitu sebesar 1,81 atau naik sebesar 1,29 dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal.



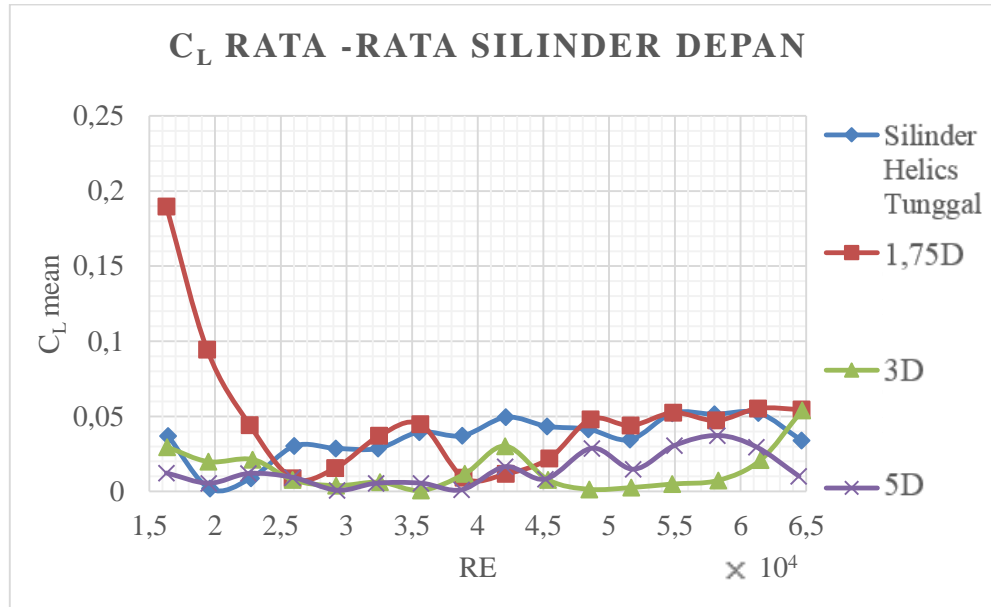
Gambar 4.23. C_{Lrms} Konfigurasi *Tandem* 5D.

4.3.3 Pengaruh Variasi Jarak terhadap \bar{C}_L dan C_{Lrms}

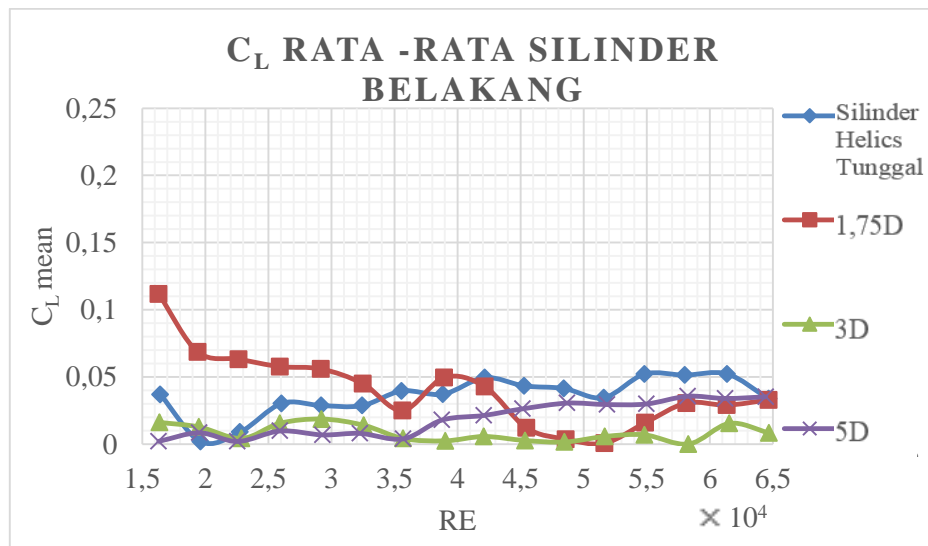
Sebagaimana analisis yang dilakukan pada koefisien drag, hasil dari pengujian koefisien lift untuk silinder depan dan silinder belakang pada setiap variasi jarak di plot dalam satu grafik (lihat Gambar 4.24, Gambar 4.25, Gambar 4.26 dan Gambar 4.27).

Koefisien gaya *lift* rata - rata (\bar{C}_L) untuk silinder depan terbesar terjadi pada jarak 1,75D yaitu sebesar 0,19 pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$. Sedangkan koefisien gaya *lift* rata – rata (\bar{C}_L) silinder belakang terbesar terjadi pada jarak 1,75D yaitu sebesar 0,11 pada angka Reynolds $1,6 \times 10^4$. Hampir sebagian besar koefisien lift berada pada nilai yang mendekati angka nol. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh

variasi jarak pada konfigurasi *tandem* tidak berpengaruh signifikan terhadap koefisien lift rata-rata kedua silinder (lihat Gambar 4.24 dan 4.25).



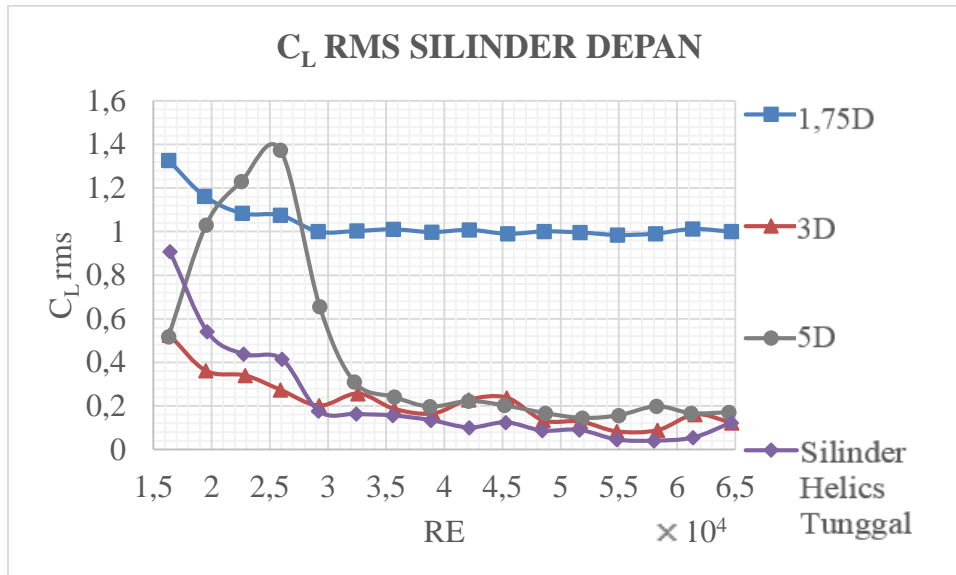
Gambar 4.24. \bar{C}_L Silinder Depan Konfigurasi *Tandem*



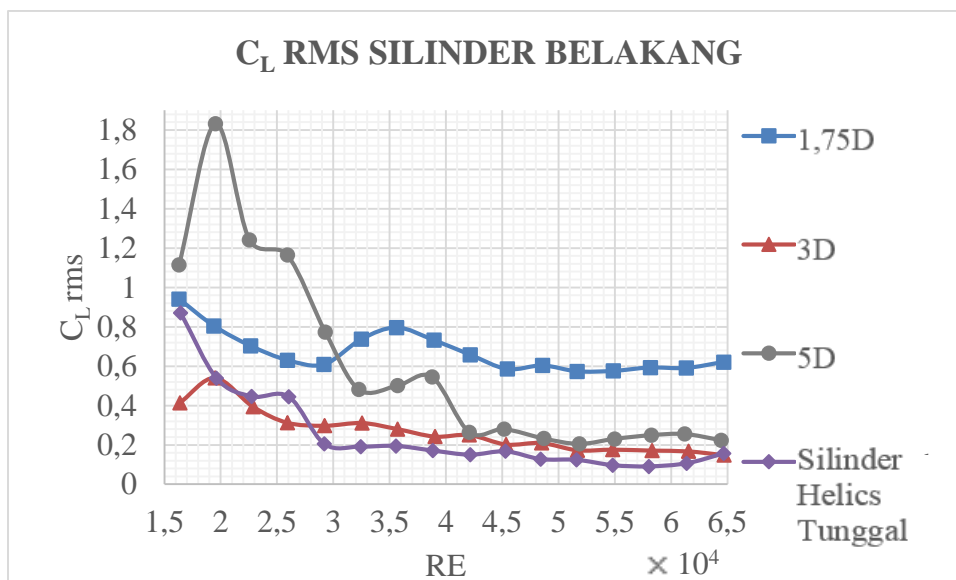
Gambar 4.25. \bar{C}_L Silinder Belakang Konfigurasi *Tandem*

Sedangkan untuk koefisien lift *root mean square*, secara umum C_{Lrms} untuk konfigurasi 1,75D mendapat pengaruh interferensi paling besar berupa kenaikan C_{Lrms} di seluruh angka Reynolds (Gambar 4.26 dan Gambar 4.27). Interferensi yang besar ini berpengaruh baik pada silinder depan dan silinder belakang.

Kemudian untuk jarak 3D, interferensi tidak terlalu besar karena C_{Lrms} tidak berubah jauh dari kondisi tunggal. Selanjutnya untuk jarak 5D, C_{Lrms} mendapat pengaruh interferensi pada angka Reynolds kecil. Pengaruh tersebut berkurang seiring dengan meningkatnya angka Reynolds.



Gambar 4.26. C_{Lrms} Silinder Depan Konfigurasi *Tandem*



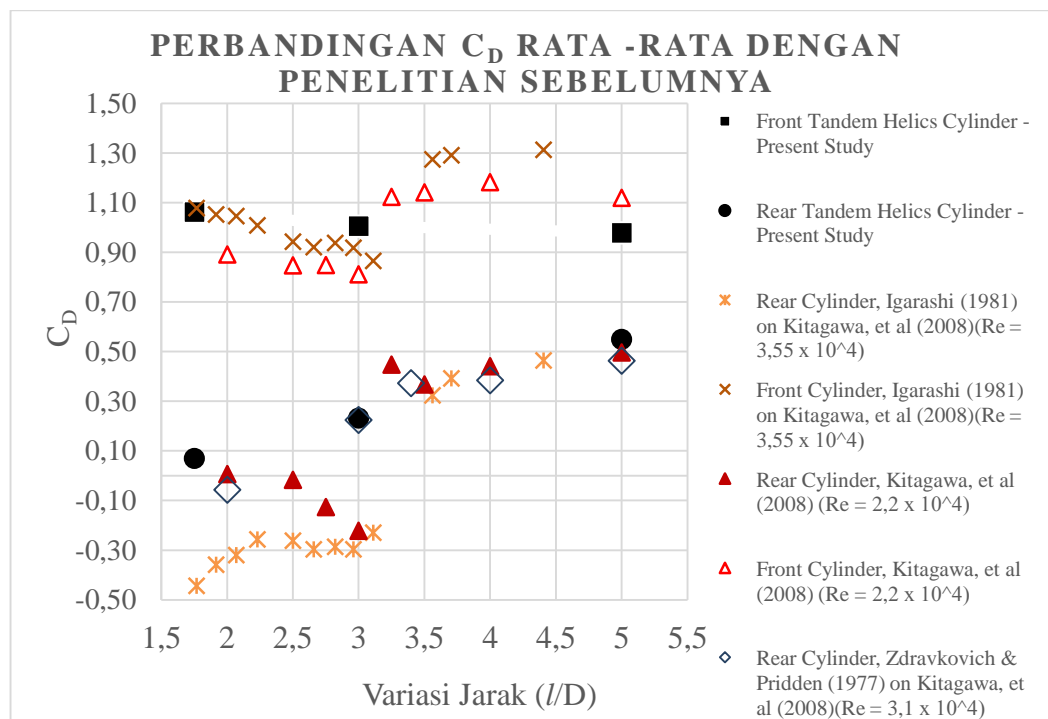
Gambar 4.27. C_{Lrms} Silinder Belakang Konfigurasi *Tandem*

4.4 Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya

Sebagai analisis lanjutan, \bar{C}_D , C_D osilasi dan C_L osilasi pada angka $Re\ 4,2 \times 10^4$ diambil sebagai sampel data yang tervalidasi baik. Untuk C_D osilasi dan C_L osilasi

pada bab ini dihitung dengan mengurangi nilai komponen *root mean square* dengan nilai komponen rata-ratanya.

Gambar 4.28 menunjukkan hasil pengujian \bar{C}_D silinder helics pada $Re\ 4,2 \times 10^4$ yang ini telah dibandingkan dengan data relevan seperti yang diberikan oleh Igarashi dalam Kitagawa, dkk (2008); Zdravkovich, dkk dalam Kitagawa, dkk (2008) dan Kitagawa, dkk (2008). Semua penelitian tersebut menyelidiki karakteristik \bar{C}_D yang mengalir disekitar silinder polos dengan konfigurasi tandem pada daerah Reynolds subkritis ($2,2 \times 10^4$, $3,1 \times 10^4$, dan $3,55 \times 10^4$) yang sebanding dengan penelitian ini. Secara umum, perbandingan tersebut menunjukkan kesesuaian \bar{C}_D yang baik di hampir semua variasi jarak (l/D). Terdapat sedikit perbedaan nilai \bar{C}_D dapat diakibatkan oleh penambahan helics. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan karakteristik \bar{C}_D terhadap perubahan l/D yang signifikan antara silinder polos dan silinder dengan helical rods ber-gap.

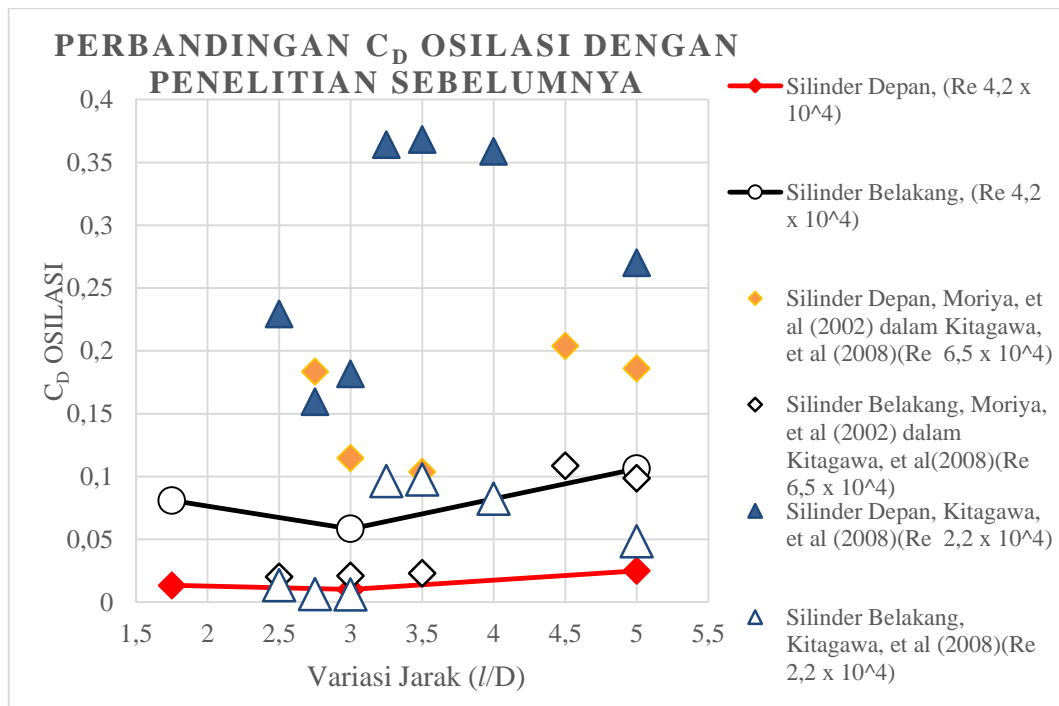


Gambar 4.28. Perbandingan \bar{C}_D dengan Penelitian Sebelumnya.

Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 menunjukkan hasil pengujian C_D osilasi dan C_L osilasi silinder helics pada $Re\ 4,2 \times 10^4$ yang ini telah dibandingkan dengan data relevan oleh Moriya, dkk (2002) dalam Kitagawa, dkk (2008); dan Kitagawa, dkk

(2008). Kedua data tersebut juga masuk kedalam daerah subkritis yang sama dengan data pada penelitian ini.

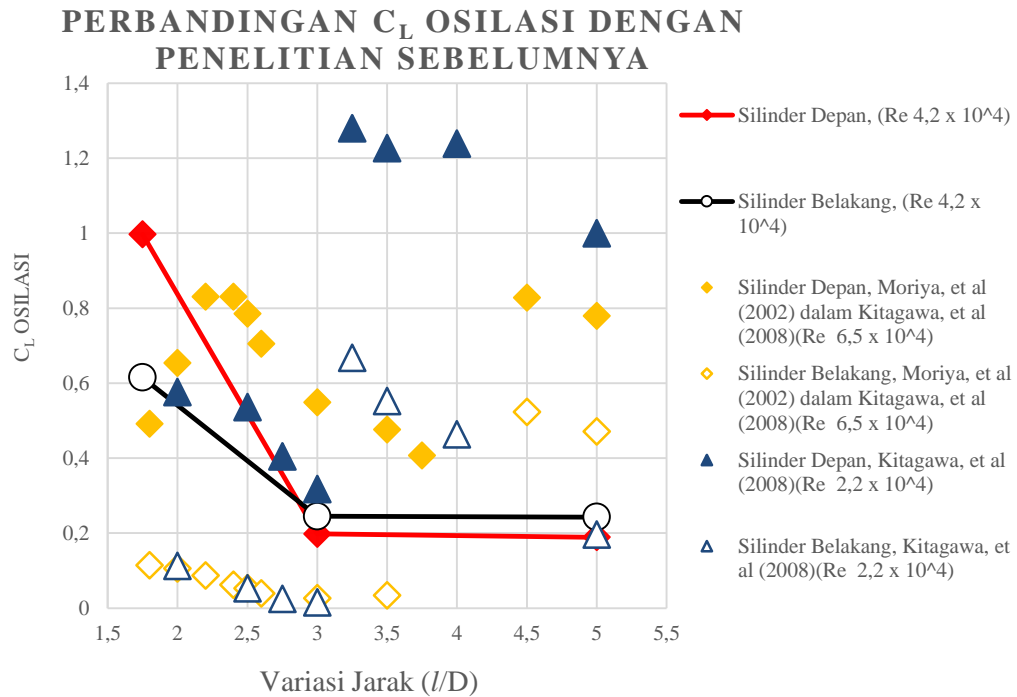
Pada Gambar 4.29, C_D osilasi silinder depan seharusnya memiliki nilai yang lebih tinggi di seluruh variasi l/D jika dibandingkan dengan C_D osilasi silinder belakang jika dibandingkan dengan kedua data referensi tersebut. Akan tetapi hasil dari pengujian menunjukkan bahwa C_D osilasi silinder depan memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan C_D osilasi silinder belakang. C_D osilasi silinder belakang cenderung sangat kecil akibat gangguan dari helics dan struktur silinder belakangnya. Sedangkan untuk silinder belakang, terjadi sedikit peningkatan nilai C_D osilasi untuk konfigurasi 1,75D dan 3D.



Gambar 4.29. Perbandingan C_D osilasi dengan Penelitian Sebelumnya.

Gambar 4.30 menunjukkan hasil pengujian C_L osilasi silinder helics pada $Re 4,2 \times 10^4$ yang ini telah dibandingkan dengan data referensi. Jika dibandingkan dengan kedua data tersebut, C_L osilasi silinder depan pada konfigurasi 3D dan 5D yang seharusnya berada dibawah nilai C_L osilasi silinder belakang justru memiliki nilai yang lebih rendah. Terjadi perubahan tren perubahan nilai C_L osilasi baik untuk silinder depan dan silinder belakang jika dibandingkan dengan data referensi. Meski

begitu, baik silinder depan dan silinder belakang memiliki pola perubahan C_L osilasi yang sama terhadap perubahan l/D yaitu memiliki nilai tertinggi pada $1,75D$ kemudian turun pada $3D$ dan $5D$ pada nilai yang tidak jauh berbeda.



Gambar 4.30. Perbandingan C_L osilasi dengan Penelitian Sebelumnya.

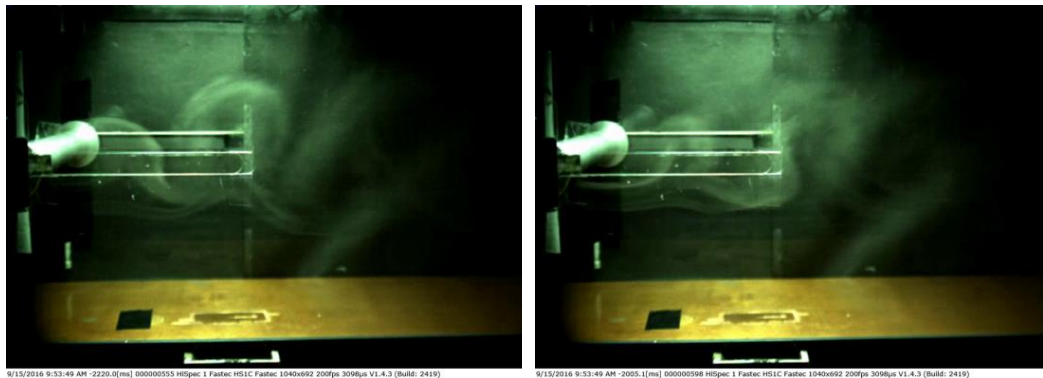
4.5 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder

Pola aliran yang terbentuk dibelakang silinder berpengaruh terhadap resultan gaya drag maupun gaya lift yang terjadi pada silinder. Visualisasi aliran bertujuan untuk mengetahui pola aliran yang terjadi di belakang model. Metode yang dipakai adalah metode pelacakan partikel dengan bantuan asap. Asap yang dihasilkan smoke generator diharapkan mampu memberikan warna aliran fluida sehingga pola yang terjadi dapat ditangkap oleh kamera kecepatan tinggi (*high speed camera*). Pada pengujian visualisasi aliran fluida ini, kecepatan aliran yang digunakan adalah kecepatan 5 m/s saja. Hal ini disebabkan pada kecepatan > 5 m/s, aliran yang terbentuk dibelakang model tidak dapat ditangkap dengan baik oleh kamera kecepatan tinggi. Walaupun kapasitas kamera mampu memperlambat gambar hingga 1000 *fps* akan tetapi faktor pencahayaan dan kapasitas smoke generator

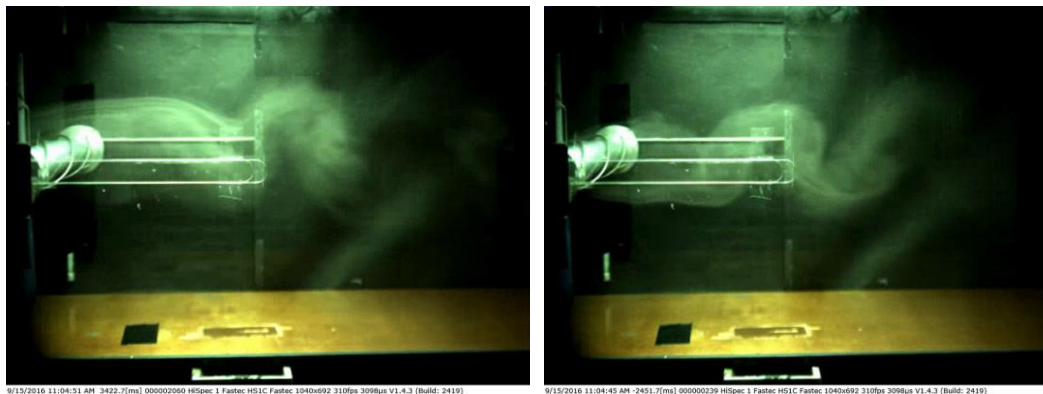
menjadi batasan dalam pengujian visualisasi aliran fluida ini sehingga fps yang digunakan pada kamera adalah 300 fps.

4.4.1 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder Tunggal

Gambar 4.31 menunjukkan pola aliran vortex dibelakang silinder polos tunggal pada kecepatan 5 m/s ($Re : 1,6 \times 10^4$), sedangkan Gambar 4.32 menunjukkan pola aliran vortex pada silinder helics tunggal pada kecepatan yang sama. Dari kedua pengujian tersebut, dapat dilihat bahwa vortex dibelakang silinder helics tunggal memiliki jarak yang lebih jauh untuk melepaskan diri dibandingkan dengan vortex yang terlepas dari silinder polos tunggal. Selain itu terlihat bahwa aliran fluida yang membentuk vortex pada silinder helics terurai akibat keberadaan helics. Meski begitu vortex yang terjadi pada silinder helics kondisi tunggal masih terlihat teratur.



Gambar 4.31. Pola Aliran Dibelakang Silinder Polos Tunggal pada $v = 5$ m/s
($Re : 1,6 \times 10^4$)



Gambar 4.32. Pola Aliran Dibelakang Silinder Helics Tunggal pada $v = 5$ m/s
($Re : 1,6 \times 10^4$)

4.4.2 Visualisasi Aliran di Belakang Silinder Konfigurasi Tandem

Hasil dari pengujian visualisasi aliran untuk konfigurasi ditunjukkan pada Gambar 4.33, Gambar 4.34 dan Gambar 4.35. Gambar 4.33 merupakan pola aliran dibelakang silinder konfigurasi tandem untuk jarak $1,75D$. Pada gambar tersebut terlihat bahwa ada lapisan batas yang terbentuk menyelubungi kedua permukaan model bersamaan. Lapisan batas yang terbentuk di bagian atas dan bawah silinder terlihat mengalir seirama dan berubah setiap waktu. Perubahan bentuk aliran fluida dibelakang silinder mengindikasikan adanya perubahan tekanan dibelakang silinder. Perubahan bentuk aliran tidak sampai menyebabkan terpotongnya suplai aliran masing- masing lapisan batas sehingga tidak terjadi pelepasan vortex. Meski begitu, terlihat bahwa ulakan - ulakan kecil terjadi di dalam daerah lapisan batas yang terbentuk dibelakang silinder.

Gambar 4.34 merupakan pola aliran dibelakang silinder konfigurasi tandem untuk jarak $3D$. Pada gambar tersebut terlihat bahwa ada ulakan yang terbentuk tidak sempurna dibelakang silinder depan yang kemudian menyentuh permukaan silinder belakang. Hal ini menyebabkan aliran dibelakang silinder kedua menjadi terpecah dan membentuk pola aliran yang tidak teratur. Aliran fluida terlihat terurai sehingga pola dibelakang fluida terlihat samar – samar jika dibandingkan dengan konfigurasi tunggal ataupun $1,75D$. Hal ini mungkin disebabkan posisi helics yang tepat berada pada jalur aliran pembentuk vortex sehingga terjadi gangguan pada aliran dibelakang model.

Sedangkan Gambar 4.35 merupakan pola aliran dibelakang silinder konfigurasi tandem untuk jarak $5D$. Pada gambar tersebut terlihat bahwa terjadi pelepasan vortex dibelakang silinder depan. Vortex yang terlepas tersebut kemudian menyentuh permukaan silinder belakang. Hal ini menyebabkan vortex yang terlepas tersebut terurai dan membentuk aliran acak dibelakang silinder belakang.



Gambar 4.33 Pola Aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak $1,75D$ pada $v = 5 \text{ m/s}$ ($Re : 1,6 \times 10^4$)



Gambar 4.34 Pola Aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak $3D$ pada $v = 5 \text{ m/s}$ ($Re : 1,6 \times 10^4$)



Gambar 4.35 Pola Aliran Dibelakang Silinder Konfigurasi Tandem untuk Jarak $5D$ pada $v = 5 \text{ m/s}$ ($Re : 1,6 \times 10^4$)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen dan analisa dalam penelitian ini, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. \bar{C}_D dan C_{Drms} silinder depan mendapat pengaruh interferensi dari silinder belakang berupa reduksi gaya drag yang semakin besar seiring dengan meningkatnya jarak l/D pada Re tervalidasi baik ($Re > 3,2 \times 10^4$). Interferensi terbesar untuk \bar{C}_D terjadi pada angka Reynolds $3,9 \times 10^4$ dengan penurunan sebesar 0,13 atau sekitar 11,4% dan untuk C_{Drms} terjadi pada $Re 2,9 \times 10^4$ sebesar 0,14 atau sekitar 12,15% dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal. Sedangkan untuk \bar{C}_D dan C_{Drms} silinder belakang mendapat pengaruh interferensi dari silinder depan berupa efek *shielding* di seluruh Re. Faktor *shielding* silinder belakang untuk konfigurasi 1,75D; 3D dan 5D pada $Re 4,2 \times 10^4$ sebesar 0,064; 0,213; 0,504 dan C_{Drms} konfigurasi 1,75D; 3D dan 5D sebesar 0,138; 0,265; 0,599.
2. Tidak ada perubahan signifikan untuk \bar{C}_L silinder helics pada kondisi tandem dibandingkan pada kondisi tunggal. Pengaruh Re terhadap C_{Lrms} signifikan terjadi pada konfigurasi 5D berupa peningkatan C_{Lrms} pada angka Re rendah. Dimana untuk silinder depan, C_{Lrms} terbesar terjadi pada angka $Re 2,6 \times 10^4$ dengan nilai 1,36 atau naik sebesar 0,92 dibandingkan dengan C_{Lrms} silinder helics kondisi tunggal. Sedangkan untuk silinder belakang C_{Lrms} terbesar terjadi pada angka $Re 1,9 \times 10^4$ yaitu sebesar 1,81 atau naik sebesar 1,29 dibandingkan dengan \bar{C}_D silinder helics konfigurasi tunggal. Interferensi memiliki pengaruh kuat terhadap C_{Lrms} pada jarak 1,75D berupa peningkatan C_{Lrms} untuk silinder depan dan silinder belakang di seluruh Re.
3. Pada pengujian visualisasi aliran fluida, terlihat bahwa pada jarak terdekat (1,75D) pola aliran yang terjadi masuk kedalam kategori W-T1 sedangkan untuk jarak 3D dan 5D masuk kedalam kategori W-T2 menurut klasifikasi

Zdravkovich (1987). Meski begitu, terjadi perubahan pola *vortex street* di seluruh konfigurasi akibat pemasangan *triple helical rods* ber-gap yang berperan dalam memecah *vortex shedding* yang terjadi.

5.2 Saran

1. Dalam pengolahan data *load cell* harus menggunakan analisis redaman *noise* untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.
2. Studi lebih lanjut menggunakan perhitungan numerik pada variasi jarak dan angka Reynolds yang lain terhadap gaya drag, gaya lift dan pola aliran fluida.
3. Studi lebih lanjut mengenai pengaruh jarak terhadap frekuensi *vortex shedding*.
4. Studi lebih lanjut untuk menghitung efek blockage.
5. Studi eksperimen untuk kondisi tandem lebih dari dua struktur silinder dengan *helical rods* ber-gap.
6. Hasil penelitian ini tidak dapat di aplikasikan pada kondisi laut sebenarnya, karena rentang Reynolds di lapangan berada pada $Re > 10^7$ sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk keperluan aplikasi teknik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Musthofa, A. Z. (2014). *Studi Eksperimen Kinerja Desain Helical Rods Bergap untuk Mengurangi Vortex Induced Vibration (VIV) pada Silinder*. Surabaya: ITS.
- American Petroleum Institute. (2002). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*. Washington D.C: API Publishing Services.
- Asyikin, M. T. (2012). *CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Blevins, R. D. (2001). *Flow-Induced Vibration*. Malabar: Krieger Publishing Company.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Hall, N. (2015, May 05). *Open Return Wind Tunnel*. Retrieved from National Aeronautics and Space Administration: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- Hanifah, S., & Handayani, S. U. (2015). *Analisis Distribusi Kecepatan Aliran Wind Tunnel Tipe Terbuka*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kitagawa, T., & Ohta, H. (2008). Numerical Investigation on Flow Around Circular Cylinders in Tandem Arrangement at a Subcritical Reynolds Number. *Journal of Fluids and Structures* 24, 680-699.
- Papaioannou, G. V., Yue, D. K., Triantafyllou, M. S., & Karniadakis, G. E. (2007). On the Effect of Spacing on the Vortex-Induced Vibrations of Two Tandem Cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 833-854.
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., & Ramadan, B. H. (2012). *Mechanics of Fluids*. Stamford: Global Engineering.
- Sugiwanto, A., Prastianto, R. W., Murdjito, & Djatmiko, E. B. (2013). A Numerical Study on Cylinders with Passive Control Device of Helical Rods with Gap for Reducing Vortex-Induced Vibration. *International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment*, 357-368.
- Sumer, M., & Fredsoe, J. (2006). *Hydrodynamics Around Cylindrical Structure*. Singapore: FuIsland Offset Printing (S) Pte Ltd.
- Wieselberger, C. (1922). *New Data on the Laws of FLuid Resistance*. N.A.C.A.

- Zdravkovich, M. M. (1981). Review and Classification of Various Aerodynamics and Hydrodynamics Means for Suppressing Vortex Shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145-189.
- Zdravkovich, M. M. (1987). The Effects of Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow. *Journal of Fluids and Structures*, 239-261.
- Zikri, A. A. (2016, January 9). *Laboratorium Low Speed Wind Tunnel*. Retrieved from Balai Besar Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika dan Aeroakustika: <http://bbta3.bppt.go.id/bbta3/laboratorium-low-speed-wind-tunnel-lswt/>

DETAIL PEMBUATAN MODEL UJI

Pada pengujian yang akan dilakukan, model uji terdiri dari dua jenis yaitu model silinder polos (*bare cylinder*) dan model silinder dengan lilitan *helical rods*. Model silinder polos sebanyak 1 buah dan model silinder dengan lilitan *helical rods* sebanyak dua buah. Kondisi *rod* nya dililitkan secara *helic* disekeliling silinder dalam konfigurasi *triple helics* dengan gap tertentu terhadap silinder. Adapun dimensi dari model fisik silinder diberikan pada Tabel 3.1.

Bahan yang diperlukan dalam membuat 3 model uji tersebut adalah sebagai berikut:

- Pipa aluminium diameter 2 inch (5.08 cm) 150 cm
- As-drat besi diameter 1.2 cm 60 cm sebanyak 3 buah
- 1 gulung kawat diameter 3 mm
- Aluminium pejal diameter 8 cm
- 6 mur diameter 4 mm dan 6 mur diameter 5 mm
- Potongan akrilik 0.3 mm x 0.3 mm x 0.3 mm sebanyak 18 buah

Setelah bahan tersedia maka pembuatan model dapat dilakukan. Adapun tahapan pembuatan model adalah sebagai berikut :

- Membagi pipa aluminium menjadi 3 bagian dengan panjang masing-masing 48 cm.
- Membuat *end plate* silinder dari aluminium pejal sebanyak 6
- Membuat 2 lubang mur pada kedua ujung silinder sebagai tempat pengunci *end plate* dan pengunci asrat.
- Memasukkan asrat kedalam silinder

Untuk menambahkan *helical rods* pada silinder dilakukan dengan cara sebagai berikut :

- *End plate* silinder dibor pada 3 titik dengan sudut masing-masing 120° dari pusat dengan gap 3 mm.
- Potong kawat tembaga menjadi 3 bagian sama besar @52.5 cm untuk masing-masing model
- Agar lilitan merata pada setiap permukaan silinder, silinder dibungkus dengan kertas karton setebal 3 mm

- Masukkan ujung kawat pada *end plate* dan lilitkan kawat pada silinder sebanyak satu putaran sehingga membentuk helix
- Lepas bungkus kertas dan pasang gap pada 0,25 0,5 dan 0,75 panjang silinder.

Model uji yang telah selesai dibuat tertera pada Gambar Lampiran A.1 dan A.2.



Gambar Lampiran A.1 Model Silinder Polos



Gambar Lampiran 3 Model Silinder dengan *Triple Helical Rods* ber-gap

HASIL PENCATATAN FREKUENSI FAN DRIVER

Dalam proses kalibrasi fan driver, frekuensi fan untuk membangkitkan kecepatan tertentu yang terbaca oleh sensor anemometer di dalam ruang seksi uji dicatat. Hasil pencatatan fan driver untuk seluruh kondisi pengujian ditunjukkan oleh Tabel Lampiran B.1.

Tabel Lampiran B.1. Rekaman Gaya Drag Silinder Polos Loadcell 1

Silinder Polos Tunggal

V (m/s)	F (Hz)
0	0
5	6.9
6	8.3
7	9.65
8	10.9
9	12.15
10	13.4
11	14.6
12	15.9
13	17.1
14	18.3
15	19.5
16	20.85
17	22.1
18	23.4
19	24.6
20	25.8

Silinder Helic Tunggal

V (m/s)	F (Hz)
0	0
5	6.9
6	8.3
7	9.65
8	10.9
9	12.15
10	13.5
11	14.7
12	16.1
13	17.35
14	18.6
15	19.9
16	21.2
17	22.4
18	23.7
19	24.9
20	26

Konfigurasi
Tandem L/D =
1.75

V (m/s)	F (Hz)
0	0
5	6.9
6	8.2
7	9.5
8	10.7
9	12.1
10	13.45
11	14.75
12	16.05
13	17.4
14	18.7
15	20
16	21.3
17	22.5
18	23.8
19	25
20	26.2

Konfigurasi
Tandem L/D = 3.00

V (m/s)	F (Hz)
0	0
5	6.9
6	8.2
7	9.5
8	10.7
9	12.1
10	13.3
11	14.7
12	16
13	17.3
14	18.6
15	19.9
16	21.15
17	22.4
18	23.7
19	24.9
20	26.1

Konfigurasi
Tandem L/D = 5.00

V (m/s)	F (Hz)
0	0
5	6.9
6	8.2
7	9.5
8	10.7
9	12.1
10	13.4
11	14.7
12	16
13	17.3
14	18.6
15	19.9
16	21.15
17	22.4
18	23.7
19	25
20	26.2

DETAIL KALIBRASI LOAD CELL



Gambar Lampiran C.1. Diagram Alir Pembacaan Sinyal pada *Load Cell*

Load cell yang digunakan dalam pengujian adalah *load cell* tipe S kapasitas 25 lb atau 111.11 N dan *load cell* tipe *beam* kapasitas 10 kg atau 100 N. Secara umum cara kerja *load cell* adalah memberikan sinyal listrik ketika dikenai beban tertentu. Sinyal listrik inilah yang kemudian diubah menjadi besaran gaya. Akuisisi data tersebut menggunakan perangkat lunak *Labview* and perangkat keras produk *National Instrument*. Agar pembacaan gaya pada load cell sesuai, maka perlu dilakukan kalibrasi load cell. Adapun Prosedur kalibrasi load cell adalah sebagai berikut.

- a. Mempersiapkan alat bantu yang digunakan, diantara timbangan digital, kepingan logam (atau benda bermassa lainnya) dan penyangga beban (Gambar Lampiran C.2).



(a)



(b)

Gambar Lampiran C.2. Peralatan yang digunakan untuk kalibrasi load cell (a) timbangan digital dan (b) kepingan logam dan penyangga.

- b. Pada data akuisisi software labview, persamaan yang digunakan adalah $y=x$; dimana berat benda tersebut sama dengan sinyal listrik yang ditangkap.
- c. Menimbang logam pada timbangan (Gambar Lampiran C.3), kemudian hasil pengukuran dicatat.



Gambar Lampiran C.3.
Penimbangan logam pada
timbangan

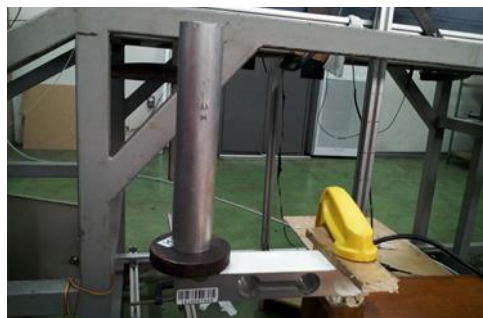
- d. Massa diletakkan pada load cell dengan kondisi tarik/tekan. Kemudian hasil sinyal listrik dicatat (Gambar Lampiran C.4).



(a)



(b)



(c)

Gambar Lampiran C.4. Pengukuran beban untuk (a) loadcell S kondisi tekan (b) loadcell S kondisi tarik (c) loadcell beam kondisi tekan/tarik.

- e. Mengulang langkah c-d tanpa mengurangi massa yang telah diletakkan pada load cell. Sehingga berat yang diterima load cell secara bertahap bertambah.
- f. Berat benda pada timbangan dan sinyal listrik yang diterima dicatat pada Tabel Lampiran C.1.

LC 1 (Loadcell S)		LC 2 (Loadcell S)		LC 3 (Loadcell S)		LC 4 (Loadcell Beam)	
Beban (gram)	Signal (volt)	Beban (gram)	Signal (volt)	Beban (gram)	Signal (volt)	Beban (gram)	Signal (volt)
						5,00	-0,05
4,80	-0,04	4,00	-0,03	4,50	-0,04	9,50	-0,09
9,20	-0,09	8,40	-0,07	8,90	-0,09	14,40	-0,14
13,90	-0,13	13,40	-0,12	13,60	-0,13	19,30	-0,19
18,90	-0,17	18,20	-0,16	18,60	-0,18	24,10	-0,24
23,20	-0,21	23,10	-0,20	23,60	-0,22	34,50	-0,34
28,20	-0,25	27,80	-0,24	27,60	-0,26	44,80	-0,45
33,00	-0,29	32,80	-0,29	32,40	-0,30	54,90	-0,55
37,00	-0,33	37,10	-0,32	36,70	-0,34	65,20	-0,66
42,00	-0,37	41,60	-0,36	41,50	-0,39	75,60	-0,76
46,50	-0,40	46,50	-0,40	46,40	-0,44	146,30	-1,47
						326,60	-3,28
-4,40	0,04	-4,70	0,04	-4,50	0,05	-5,00	0,05
-8,80	0,08	-9,70	0,09	-9,00	0,09	-9,50	0,10
-13,50	0,12	-14,50	0,13	-13,70	0,13	-14,30	0,14
-18,00	0,16	-18,50	0,16	-18,70	0,18	-19,20	0,19
-23,00	0,20	-22,90	0,20	-22,70	0,22	-24,10	0,24
-27,80	0,25	-27,90	0,24	-27,70	0,26	-34,40	0,35
-32,80	0,29	-32,20	0,28	-32,00	0,31	-44,80	0,45
-37,60	0,33	-36,70	0,32	-36,80	0,35	-54,80	0,55
-42,60	0,38	-41,60	0,36	-41,60	0,40	-65,10	0,66
-46,60	0,41	-46,60	0,40	-46,60	0,44	-75,50	0,76
						-146,30	1,47
						-200,90	2,02
						-381,20	3,83

- g. Dari data tersebut, didapatkan hasil regresi linear hubungan antara berat benda dan sinyal listrik load cell. Hasil regresi tersebut yang digunakan dalam konversi sinyal volt menjadi gaya.

DETAIL PERHITUNGAN PENGUJIAN GAYA

Pada pengujian gaya, data – data yang diperoleh selama pengujian meliputi data kecepatan aliran, temperatur, tekanan yang berasal dari anemometer digunakan untuk menghitung viskositas kinematis udara dan angka Reynolds menggunakan Persamaan 2.1, Persamaan 2.3, Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.6. Kemudian data sinyal gaya yang berasal dari pembacaan loadcell digunakan untuk menghitung koefisien gaya rata -rata dan koefisien gaya *root mean square* menggunakan Persamaan 2.7, Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.9. Hasil – hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada Gambar Lampiran D. Untuk pembacaan anemometer dapat dilihat pada Lampiran E. Sedangkan pembacaan load cell dapat dilihat pada Lampiran F.

Tabel Lampiran D.1. Perhitungan Gaya Drag Silinder Polos

Drag Silinder Polos										
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F_D MEAN Silinder Polos (N)	C_D MEAN Silinder Polos	F_D RMS Silinder Polos (N)	C_D RMS Silinder Polos
5,02	297,0	1002,1	1,1756	1,832,E-05	1,558,E-05	1,6,E+04	0,361	1,000	0,434	1,203
6,01	297,6	1002,1	1,1732	1,834,E-05	1,564,E-05	2,0,E+04	0,538	1,042	0,586	1,135
7,02	297,8	1002,1	1,1724	1,835,E-05	1,565,E-05	2,3,E+04	0,761	1,080	0,814	1,155
7,97	297,9	1002,2	1,1722	1,836,E-05	1,566,E-05	2,6,E+04	0,969	1,067	1,018	1,122
8,99	298,0	1001,9	1,1714	1,836,E-05	1,568,E-05	2,9,E+04	1,288	1,116	1,313	1,138
9,97	298,1	1002,2	1,1714	1,837,E-05	1,568,E-05	3,2,E+04	1,647	1,160	1,670	1,177
11,04	298,1	1002,0	1,1711	1,837,E-05	1,568,E-05	3,6,E+04	2,063	1,185	2,077	1,194
12,02	298,1	1002,0	1,1711	1,837,E-05	1,568,E-05	3,9,E+04	2,484	1,204	2,494	1,209
12,99	298,3	1001,9	1,1702	1,838,E-05	1,570,E-05	4,2,E+04	2,893	1,201	2,912	1,210
13,99	298,2	1002,0	1,1707	1,837,E-05	1,569,E-05	4,5,E+04	3,365	1,205	3,384	1,211
14,98	298,3	1001,9	1,1702	1,838,E-05	1,570,E-05	4,8,E+04	3,927	1,227	3,946	1,233
15,95	298,3	1001,8	1,1701	1,838,E-05	1,571,E-05	5,2,E+04	4,517	1,244	4,540	1,251
17,01	298,5	1001,6	1,1691	1,839,E-05	1,573,E-05	5,5,E+04	5,190	1,258	5,234	1,269
18,00	298,4	1001,7	1,1696	1,838,E-05	1,572,E-05	5,8,E+04	5,933	1,284	6,014	1,302
18,97	298,5	1001,7	1,1692	1,839,E-05	1,573,E-05	6,1,E+04	6,346	1,237	6,397	1,247
20,03	298,5	1001,6	1,1691	1,839,E-05	1,573,E-05	6,5,E+04	6,976	1,220	7,059	1,234

Tabel Lampiran D.2. Perhitungan Gaya Drag Silinder Helics

Drag Silinder Helics										
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _D MEAN Silinder Helics (N)	C _D MEAN Silinder Helics	F _D RMS Silinder Helics (N)	C _D RMS Silinder Helics
5,01	297,5	1002,6	1,1742	1,834,E-05	1,562,E-05	1,6,E+04	0,325	0,906	0,460	1,274
6,02	297,8	1002,7	1,1731	1,835,E-05	1,564,E-05	2,0,E+04	0,531	1,024	0,633	1,225
6,98	297,8	1002,6	1,1730	1,835,E-05	1,565,E-05	2,3,E+04	0,752	1,079	0,845	1,199
8,00	297,9	1002,7	1,1727	1,836,E-05	1,565,E-05	2,6,E+04	0,983	1,074	1,084	1,193
9,04	298,0	1002,7	1,1724	1,836,E-05	1,566,E-05	2,9,E+04	1,247	1,067	1,300	1,125
10,03	298,0	1002,7	1,1724	1,836,E-05	1,566,E-05	3,2,E+04	1,542	1,073	1,571	1,106
10,98	298,1	1002,6	1,1718	1,837,E-05	1,567,E-05	3,6,E+04	1,863	1,081	1,892	1,087
11,96	298,1	1002,6	1,1718	1,837,E-05	1,567,E-05	3,9,E+04	2,256	1,104	2,279	1,104
12,95	298,0	1002,6	1,1722	1,836,E-05	1,566,E-05	4,2,E+04	2,612	1,090	2,639	1,094
13,96	298,1	1002,7	1,1720	1,837,E-05	1,567,E-05	4,5,E+04	3,029	1,088	3,094	1,106
15,01	298,1	1002,6	1,1718	1,837,E-05	1,567,E-05	4,9,E+04	3,473	1,079	3,503	1,093
16,02	298,4	1002,7	1,1708	1,838,E-05	1,570,E-05	5,2,E+04	3,940	1,075	3,979	1,096
16,96	298,4	1002,7	1,1708	1,838,E-05	1,570,E-05	5,5,E+04	4,431	1,079	4,454	1,078
17,99	298,4	1002,8	1,1709	1,838,E-05	1,570,E-05	5,8,E+04	4,972	1,076	5,003	1,082
19,03	298,5	1002,8	1,1705	1,839,E-05	1,571,E-05	6,1,E+04	5,548	1,074	5,569	1,085
20,04	298,5	1002,7	1,1704	1,839,E-05	1,571,E-05	6,5,E+04	6,069	1,059	6,122	1,069

Tabel Lampiran D.3. Perhitungan Gaya Lift Silinder Polos

Lift Silinder Polos										
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _L MEAN Silinder Polos (N)	F _L RMS Silinder Polos (N)	C _L MEAN Silinder Polos	C _L RMS Silinder Polos
4,97	298,0	1000,5	1,1698	1,836,E-05	1,570,E-05	1,6,E+04	-0,020	0,058	0,170	0,472
6,01	297,9	1000,3	1,1699	1,836,E-05	1,569,E-05	1,9,E+04	-0,021	0,041	0,251	0,487
6,96	298,0	1000,2	1,1694	1,836,E-05	1,570,E-05	2,3,E+04	-0,022	0,032	0,458	0,652
7,95	298,1	1000,3	1,1692	1,837,E-05	1,571,E-05	2,6,E+04	-0,026	0,028	0,342	0,378
9,01	298,2	1000,2	1,1686	1,837,E-05	1,572,E-05	2,9,E+04	-0,035	0,030	0,770	0,668
9,98	298,2	1000,2	1,1686	1,837,E-05	1,572,E-05	3,2,E+04	-0,035	0,025	0,269	0,190
11,00	298,3	1000,3	1,1684	1,838,E-05	1,573,E-05	3,6,E+04	-0,042	0,024	0,519	0,299
11,96	298,4	1000,2	1,1679	1,838,E-05	1,574,E-05	3,9,E+04	-0,056	0,027	0,753	0,366
12,98	298,5	1000,2	1,1675	1,839,E-05	1,575,E-05	4,2,E+04	-0,065	0,027	0,842	0,351
13,97	298,5	1000,4	1,1677	1,839,E-05	1,575,E-05	4,5,E+04	-0,093	0,033	0,959	0,344
14,96	298,3	1000,3	1,1684	1,838,E-05	1,573,E-05	4,8,E+04	-0,090	0,028	0,638	0,200
15,99	298,4	1000,4	1,1681	1,838,E-05	1,574,E-05	5,2,E+04	-0,093	0,026	0,686	0,189
16,96	298,4	1000,4	1,1681	1,838,E-05	1,574,E-05	5,5,E+04	-0,119	0,029	0,875	0,212
18,05	298,6	1000,5	1,1674	1,839,E-05	1,575,E-05	5,8,E+04	-0,145	0,031	0,937	0,203
18,97	298,7	1000,4	1,1669	1,840,E-05	1,576,E-05	6,1,E+04	-0,152	0,030	1,161	0,227
20,02	298,9	1000,3	1,1660	1,841,E-05	1,578,E-05	6,4,E+04	-0,226	0,040	1,139	0,200

Tabel Lampiran D.4. Perhitungan Gaya Lift Silinder Helics

Lift Silinder Helics										
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _L MEAN Silinder Helics (N)	F _L RMS Silinder Helics (N)	C _L MEAN Silinder Helics	C _L RMS Silinder Helics
5,04	297,4	1003,1	1,1752	1,833,E-05	1,560,E-05	1,6,E+04	-0,013	0,037	0,314	0,871
6,04	297,4	1003,0	1,1751	1,833,E-05	1,560,E-05	2,0,E+04	-0,001	0,002	0,279	0,539
7,01	297,4	1003,0	1,1751	1,833,E-05	1,560,E-05	2,3,E+04	0,006	0,009	0,315	0,447
8,03	297,6	1003,0	1,1743	1,834,E-05	1,562,E-05	2,6,E+04	0,028	0,030	0,405	0,445
9,01	297,7	1003,1	1,1740	1,835,E-05	1,563,E-05	2,9,E+04	0,033	0,029	0,237	0,205
10,01	297,7	1002,8	1,1737	1,835,E-05	1,563,E-05	3,2,E+04	0,041	0,029	0,273	0,192
10,98	297,7	1002,9	1,1738	1,835,E-05	1,563,E-05	3,6,E+04	0,068	0,040	0,340	0,195
11,99	297,8	1002,8	1,1733	1,835,E-05	1,564,E-05	3,9,E+04	0,076	0,037	0,354	0,171
13,03	297,8	1002,7	1,1731	1,835,E-05	1,564,E-05	4,2,E+04	0,120	0,049	0,363	0,150
13,99	297,9	1002,6	1,1726	1,836,E-05	1,566,E-05	4,5,E+04	0,121	0,043	0,469	0,168
14,97	297,9	1002,7	1,1727	1,836,E-05	1,565,E-05	4,8,E+04	0,133	0,041	0,410	0,128
15,95	297,7	1002,9	1,1738	1,835,E-05	1,563,E-05	5,2,E+04	0,126	0,035	0,453	0,125
16,97	297,8	1003,0	1,1735	1,835,E-05	1,564,E-05	5,5,E+04	0,215	0,052	0,402	0,097
17,95	297,9	1003,0	1,1731	1,836,E-05	1,565,E-05	5,8,E+04	0,237	0,051	0,422	0,091
19,00	297,9	1002,8	1,1729	1,836,E-05	1,565,E-05	6,1,E+04	0,270	0,052	0,549	0,107
20,02	298,0	1002,9	1,1726	1,836,E-05	1,566,E-05	6,5,E+04	0,194	0,034	0,897	0,156

Tabel Lampiran D.5. Perhitungan Gaya Drag Tandem 1,75D

1,75D Drag														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _D MEAN Silinder Depan (N)	F _D Mean Silinder Belakang (N)	C _D MEAN Silinder Depan	C _D Mean Silinder Belakang	F _D RMS Silinder Depan (N)	F _D RMS Silinder Belakang (N)	C _D RMS Silinder Depan	C _D RMS Silinder Belakang
5,04	296,8	1003,7	1,1783	1,831,E-05	1,554,E-05	1,6,E+04	0,362	0,016	0,991	0,044	0,435	0,241	1,191	0,659
6,02	297,0	1003,8	1,1776	1,832,E-05	1,555,E-05	2,0,E+04	0,542	0,016	1,041	0,030	0,582	0,199	1,118	0,383
6,98	297,0	1003,9	1,1777	1,832,E-05	1,555,E-05	2,3,E+04	0,749	0,001	1,071	0,002	0,847	0,263	1,210	0,376
8,02	297,2	1003,9	1,1769	1,832,E-05	1,557,E-05	2,6,E+04	0,969	0,001	1,050	0,001	1,022	0,283	1,107	0,306
8,99	297,4	1003,8	1,1760	1,833,E-05	1,559,E-05	2,9,E+04	1,252	0,022	1,080	0,019	1,289	0,460	1,112	0,397
10,01	297,8	1003,9	1,1745	1,835,E-05	1,563,E-05	3,2,E+04	1,560	0,050	1,087	0,035	1,584	0,246	1,104	0,171
11,03	297,9	1003,9	1,1741	1,836,E-05	1,564,E-05	3,6,E+04	1,857	0,091	1,066	0,052	1,877	0,435	1,078	0,249
11,97	298,0	1003,8	1,1736	1,836,E-05	1,565,E-05	3,9,E+04	2,188	0,122	1,067	0,059	2,208	0,296	1,077	0,144
13,05	298,2	1003,9	1,1730	1,837,E-05	1,566,E-05	4,2,E+04	2,588	0,170	1,062	0,070	2,620	0,367	1,076	0,151
13,97	298,1	1004,0	1,1735	1,837,E-05	1,565,E-05	4,5,E+04	3,008	0,229	1,077	0,082	3,058	0,532	1,095	0,190
15,02	298,1	1003,9	1,1734	1,837,E-05	1,565,E-05	4,9,E+04	3,429	0,299	1,062	0,093	3,700	0,597	1,147	0,185
15,98	298,2	1003,9	1,1730	1,837,E-05	1,566,E-05	5,2,E+04	3,906	0,398	1,069	0,109	3,909	0,723	1,070	0,198
16,95	298,3	1003,8	1,1725	1,838,E-05	1,567,E-05	5,5,E+04	4,313	0,425	1,050	0,104	4,352	0,579	1,060	0,141
18,03	298,2	1003,8	1,1729	1,837,E-05	1,566,E-05	5,8,E+04	4,861	0,535	1,046	0,115	4,945	0,901	1,064	0,194
19,04	298,2	1003,8	1,1729	1,837,E-05	1,566,E-05	6,2,E+04	5,319	0,509	1,026	0,098	5,403	0,670	1,042	0,129
20,04	298,3	1003,9	1,1726	1,838,E-05	1,567,E-05	6,5,E+04	5,813	0,406	1,012	0,071	5,855	1,127	1,020	0,196

Tabel Lampiran D.6. Perhitungan Gaya Drag Tandem 3D

3D Drag														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _D MEAN Silinder Depan (N)	F _D Mean Silinder Belakang (N)	C _D MEAN Silinder Depan	C _D Mean Silinder Belakang	F _D RMS Silinder Depan (N)	F _D RMS Silinder Belakang (N)	C _D RMS Silinder Depan	C _D RMS Silinder Belakang
5,05	296,8	1007,4	1,1826	1,831,E-05	1,548,E-05	1,6,E+04	0,377	0,029	1,025	0,078	0,502	0,428	1,365	1,163
6,04	297,3	1007,4	1,1806	1,833,E-05	1,553,E-05	2,0,E+04	0,553	0,049	1,054	0,093	0,641	0,326	1,220	0,621
7,04	297,2	1007,4	1,1810	1,832,E-05	1,552,E-05	2,3,E+04	0,744	0,078	1,042	0,110	0,851	0,357	1,192	0,500
8,01	297,3	1007,4	1,1806	1,833,E-05	1,553,E-05	2,6,E+04	0,952	0,123	1,031	0,133	0,984	0,311	1,066	0,337
9,03	297,8	1007,3	1,1785	1,835,E-05	1,557,E-05	2,9,E+04	1,216	0,193	1,038	0,165	1,285	0,351	1,096	0,299
9,99	297,9	1007,3	1,1781	1,836,E-05	1,558,E-05	3,2,E+04	1,461	0,209	1,019	0,146	1,480	0,377	1,033	0,263
11,00	298,1	1007,3	1,1773	1,837,E-05	1,560,E-05	3,6,E+04	1,756	0,302	1,011	0,174	1,778	0,452	1,023	0,260
12,03	298,1	1007,1	1,1771	1,837,E-05	1,560,E-05	3,9,E+04	2,078	0,469	1,000	0,226	2,091	0,595	1,007	0,287
13,02	298,2	1007,1	1,1767	1,837,E-05	1,561,E-05	4,2,E+04	2,448	0,564	1,007	0,232	2,473	0,706	1,017	0,290
14,05	298,2	1007,0	1,1766	1,837,E-05	1,561,E-05	4,5,E+04	2,821	0,712	0,996	0,251	2,869	0,883	1,013	0,312
15,04	298,1	1007,0	1,1770	1,837,E-05	1,561,E-05	4,9,E+04	3,256	0,866	1,003	0,267	3,296	1,102	1,015	0,339
15,98	298,2	1006,8	1,1764	1,837,E-05	1,562,E-05	5,2,E+04	3,681	1,028	1,005	0,281	3,705	1,117	1,012	0,305
17,03	298,2	1006,8	1,1764	1,837,E-05	1,562,E-05	5,5,E+04	4,118	1,193	0,990	0,287	4,148	1,337	0,997	0,321
17,99	298,2	1006,8	1,1764	1,837,E-05	1,562,E-05	5,8,E+04	4,624	1,200	0,996	0,259	4,669	1,455	1,006	0,314
18,99	298,3	1006,7	1,1758	1,838,E-05	1,563,E-05	6,1,E+04	5,216	1,140	1,009	0,221	5,240	1,522	1,014	0,294
20,02	298,3	1006,6	1,1757	1,838,E-05	1,563,E-05	6,5,E+04	5,711	1,104	0,994	0,192	5,758	1,866	1,002	0,325

Tabel Lampiran D.7. Perhitungan Gaya Drag Tandem 5D

5D Drag														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _D MEAN Silinder Depan (N)	F _D Mean Silinder Belakang (N)	C _D MEAN Silinder Depan	C _D Mean Silinder Belakang	F _D RMS Silinder Depan (N)	F _D RMS Silinder Belakang (N)	C _D RMS Silinder Depan	C _D RMS Silinder Belakang
4,97	297,5	1008,7	1,1813	1,834,E-05	1,552,E-05	1,6,E+04	0,366	0,237	1,029	0,665	0,477	0,338	1,341	0,951
6,02	297,6	1008,6	1,1808	1,834,E-05	1,553,E-05	2,0,E+04	0,514	0,339	0,984	0,650	0,595	0,412	1,141	0,789
7,04	297,9	1008,6	1,1796	1,836,E-05	1,556,E-05	2,3,E+04	0,683	0,407	0,959	0,571	0,758	0,492	1,064	0,690
7,97	297,9	1008,7	1,1798	1,836,E-05	1,556,E-05	2,6,E+04	0,882	0,514	0,966	0,563	0,985	0,578	1,078	0,632
9,04	298,0	1008,6	1,1793	1,836,E-05	1,557,E-05	2,9,E+04	1,138	0,640	0,969	0,544	1,161	0,707	0,989	0,602
10,05	298,0	1008,6	1,1793	1,836,E-05	1,557,E-05	3,3,E+04	1,410	0,779	0,971	0,537	1,447	1,063	0,997	0,732
11,03	297,9	1008,6	1,1796	1,836,E-05	1,556,E-05	3,6,E+04	1,700	0,932	0,972	0,533	1,752	1,380	1,001	0,788
11,98	298,1	1008,5	1,1787	1,837,E-05	1,558,E-05	3,9,E+04	2,017	1,128	0,978	0,547	2,066	1,515	1,001	0,735
13,03	298,1	1008,5	1,1787	1,837,E-05	1,558,E-05	4,2,E+04	2,391	1,341	0,980	0,549	2,452	1,600	1,005	0,656
13,97	298,1	1008,5	1,1787	1,837,E-05	1,558,E-05	4,5,E+04	2,740	1,478	0,977	0,527	2,793	1,652	0,996	0,589
15,05	298,2	1008,4	1,1782	1,837,E-05	1,559,E-05	4,9,E+04	3,185	1,751	0,979	0,538	3,231	1,948	0,993	0,599
16,02	298,1	1008,4	1,1786	1,837,E-05	1,558,E-05	5,2,E+04	3,612	1,981	0,979	0,537	3,635	2,093	0,986	0,568
17,04	298,2	1008,3	1,1781	1,837,E-05	1,559,E-05	5,5,E+04	4,038	2,161	0,968	0,518	4,067	2,379	0,975	0,570
17,98	298,1	1008,3	1,1785	1,837,E-05	1,559,E-05	5,8,E+04	4,536	2,453	0,977	0,528	4,584	2,743	0,987	0,591
19,04	298,1	1008,2	1,1784	1,837,E-05	1,559,E-05	6,2,E+04	5,096	2,601	0,978	0,499	5,220	3,047	1,002	0,585
20,05	298,2	1008,3	1,1781	1,837,E-05	1,559,E-05	6,5,E+04	5,651	2,888	0,979	0,500	5,730	3,560	0,992	0,617

Tabel Lampiran D.8. Perhitungan Gaya Lift Tandem 1,75D

1,75D Lift														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _L MEAN Silinder Depan (N)	F _L Mean Silinder Belakang (N)	C _L MEAN Silinder Depan	C _L Mean Silinder Belakang	F _L RMS Silinder Depan (N)	F _L RMS Silinder Belakang (N)	C _L RMS Silinder Depan	C _L RMS Silinder Belakang
5,00	297,0	1005,2	1,1792	1,832,E-05	1,553,E-05	1,6,E+04	0,068	0,040	0,190	0,112	0,477	0,338	1,327	0,941
5,97	297,3	1005,1	1,1779	1,833,E-05	1,556,E-05	1,9,E+04	0,048	0,035	0,095	0,069	0,595	0,412	1,163	0,804
6,98	297,4	1005,0	1,1774	1,833,E-05	1,557,E-05	2,3,E+04	0,031	0,044	0,044	0,063	0,758	0,492	1,084	0,703
7,99	297,6	1005,0	1,1766	1,834,E-05	1,559,E-05	2,6,E+04	0,008	0,053	0,009	0,058	0,985	0,578	1,075	0,631
9,00	297,8	1005,1	1,1759	1,835,E-05	1,561,E-05	2,9,E+04	-0,018	0,065	0,016	0,056	1,161	0,707	1,000	0,609
10,03	297,8	1005,1	1,1759	1,835,E-05	1,561,E-05	3,2,E+04	-0,053	0,065	0,037	0,045	1,447	1,063	1,003	0,737
11,00	298,0	1005,0	1,1750	1,836,E-05	1,563,E-05	3,6,E+04	-0,078	0,043	0,045	0,025	1,752	1,380	1,011	0,796
12,02	298,0	1005,0	1,1750	1,836,E-05	1,563,E-05	3,9,E+04	-0,019	0,103	0,009	0,050	2,066	1,515	0,998	0,732
13,03	298,1	1005,0	1,1746	1,837,E-05	1,564,E-05	4,2,E+04	-0,029	0,104	0,012	0,043	2,452	1,600	1,008	0,658
14,04	298,3	1005,0	1,1739	1,838,E-05	1,566,E-05	4,5,E+04	-0,062	0,034	0,022	0,012	2,793	1,652	0,990	0,586
15,02	298,4	1005,0	1,1735	1,838,E-05	1,566,E-05	4,9,E+04	-0,155	0,011	0,048	0,004	3,231	1,948	1,001	0,604
15,97	298,4	1005,0	1,1735	1,838,E-05	1,566,E-05	5,2,E+04	-0,160	0,002	0,044	0,001	3,635	2,093	0,996	0,574
16,99	298,4	1004,9	1,1733	1,838,E-05	1,567,E-05	5,5,E+04	-0,217	0,065	0,053	0,016	4,067	2,379	0,985	0,576
17,99	298,6	1004,8	1,1724	1,839,E-05	1,569,E-05	5,8,E+04	-0,219	0,141	0,047	0,031	4,584	2,743	0,991	0,593
18,99	298,5	1004,8	1,1728	1,839,E-05	1,568,E-05	6,1,E+04	-0,286	0,149	0,055	0,029	5,220	3,047	1,012	0,591
20,02	298,5	1004,7	1,1727	1,839,E-05	1,568,E-05	6,5,E+04	-0,313	0,188	0,055	0,033	5,730	3,560	1,000	0,621

Tabel Lampiran D.9. Perhitungan Gaya Lift Tandem 3D

3D Lift														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _L MEAN Silinder Depan (N)	F _L Mean Silinder Belakang (N)	C _L MEAN Silinder Depan	C _L Mean Silinder Belakang	F _L RMS Silinder Depan (N)	F _L RMS Silinder Belakang (N)	C _L RMS Silinder Depan	C _L RMS Silinder Belakang
5,02	297,0	1004,4	1,1783	1,832,E-05	1,554,E-05	1,6,E+04	0,011	0,006	0,029	0,016	0,190	0,150	0,525	0,414
6,00	297,2	1004,2	1,1773	1,832,E-05	1,557,E-05	1,9,E+04	0,010	0,007	0,020	0,013	0,186	0,279	0,361	0,540
7,05	297,3	1004,1	1,1768	1,833,E-05	1,558,E-05	2,3,E+04	0,015	0,003	0,021	0,004	0,242	0,281	0,339	0,394
7,99	297,4	1004,1	1,1764	1,833,E-05	1,559,E-05	2,6,E+04	0,007	0,014	0,008	0,015	0,250	0,287	0,273	0,313
9,02	297,7	1003,7	1,1747	1,835,E-05	1,562,E-05	2,9,E+04	0,004	0,022	0,004	0,019	0,234	0,347	0,201	0,298
10,05	297,7	1003,8	1,1748	1,835,E-05	1,562,E-05	3,3,E+04	-0,009	0,020	0,006	0,014	0,371	0,451	0,256	0,312
11,02	297,9	1003,7	1,1739	1,836,E-05	1,564,E-05	3,6,E+04	-0,001	0,007	0,001	0,004	0,323	0,488	0,186	0,281
12,05	297,8	1003,6	1,1742	1,835,E-05	1,563,E-05	3,9,E+04	0,025	0,005	0,012	0,002	0,343	0,504	0,165	0,243
13,01	297,9	1003,7	1,1739	1,836,E-05	1,564,E-05	4,2,E+04	-0,073	0,014	0,030	0,006	0,553	0,607	0,228	0,251
14,01	298,0	1003,5	1,1733	1,836,E-05	1,565,E-05	4,5,E+04	-0,022	0,007	0,008	0,003	0,666	0,569	0,237	0,202
14,99	298,2	1003,6	1,1726	1,837,E-05	1,567,E-05	4,8,E+04	-0,005	0,005	0,001	0,002	0,428	0,675	0,133	0,210
15,98	298,1	1003,8	1,1732	1,837,E-05	1,566,E-05	5,2,E+04	-0,009	0,021	0,003	0,006	0,468	0,633	0,128	0,173
16,97	298,1	1003,7	1,1731	1,837,E-05	1,566,E-05	5,5,E+04	-0,020	0,028	0,005	0,007	0,340	0,727	0,082	0,176
18,04	298,0	1003,7	1,1735	1,836,E-05	1,565,E-05	5,8,E+04	0,034	0,000	0,007	0,000	0,411	0,799	0,088	0,172
19,05	298,0	1003,6	1,1734	1,836,E-05	1,565,E-05	6,2,E+04	0,109	0,080	0,021	0,015	0,834	0,870	0,161	0,168
20,03	298,2	1003,5	1,1725	1,837,E-05	1,567,E-05	6,5,E+04	0,310	0,047	0,054	0,008	0,700	0,853	0,122	0,149

Tabel Lampiran D.10. Perhitungan Gaya Lift Tandem 5D

5D Lift														
U actual	Temperature (K)	P (hPa)	ρ Udara (kg/m ³)	μ Udara	ν Udara	RE	F _L MEAN Silinder Depan (N)	F _L Mean Silinder Belakang (N)	C _L MEAN Silinder Depan	C _L Mean Silinder Belakang	F _L RMS Silinder Depan (N)	F _L RMS Silinder Belakang (N)	C _L RMS Silinder Depan	C _L RMS Silinder Belakang
5,00	296,8	1008,7	1,1841	1,831,E-05	1,546,E-05	1,6,E+04	-0,004	0,001	0,012	0,002	0,182	0,402	0,505	1,115
6,01	296,9	1008,7	1,1837	1,831,E-05	1,547,E-05	2,0,E+04	0,003	0,004	0,005	0,008	0,539	0,955	1,035	1,831
6,95	297,0	1008,5	1,1831	1,832,E-05	1,548,E-05	2,3,E+04	0,008	0,001	0,012	0,002	0,865	0,865	1,241	1,242
7,99	297,1	1008,7	1,1829	1,832,E-05	1,549,E-05	2,6,E+04	-0,009	0,009	0,009	0,010	1,257	1,073	1,365	1,165
9,04	297,5	1008,6	1,1812	1,834,E-05	1,553,E-05	2,9,E+04	0,001	0,008	0,001	0,007	0,773	0,910	0,657	0,773
9,96	297,5	1008,6	1,1812	1,834,E-05	1,553,E-05	3,2,E+04	-0,008	0,011	0,005	0,008	0,435	0,688	0,305	0,482
11,02	297,5	1008,6	1,1812	1,834,E-05	1,553,E-05	3,6,E+04	0,010	0,007	0,005	0,004	0,431	0,877	0,246	0,501
11,97	297,5	1008,6	1,1812	1,834,E-05	1,553,E-05	3,9,E+04	0,002	0,037	0,001	0,018	0,408	1,125	0,198	0,545
13,01	297,7	1008,5	1,1803	1,835,E-05	1,555,E-05	4,2,E+04	-0,040	0,052	0,016	0,021	0,501	0,643	0,206	0,264
13,95	297,5	1008,6	1,1812	1,834,E-05	1,553,E-05	4,5,E+04	-0,023	0,074	0,008	0,026	0,544	0,785	0,194	0,280
15,05	297,5	1008,7	1,1813	1,834,E-05	1,552,E-05	4,9,E+04	-0,094	0,100	0,029	0,031	0,450	0,759	0,138	0,233
16,03	297,5	1008,5	1,1811	1,834,E-05	1,553,E-05	5,2,E+04	-0,055	0,109	0,015	0,030	0,481	0,760	0,130	0,205
17,02	297,6	1008,5	1,1807	1,834,E-05	1,554,E-05	5,5,E+04	-0,127	0,125	0,031	0,030	0,525	0,962	0,126	0,231
18,02	297,7	1008,3	1,1801	1,835,E-05	1,555,E-05	5,8,E+04	-0,174	0,167	0,037	0,036	0,753	1,166	0,161	0,250
18,95	297,6	1008,3	1,1805	1,834,E-05	1,554,E-05	6,1,E+04	-0,152	0,176	0,030	0,034	0,707	1,321	0,137	0,256
19,95	297,6	1008,3	1,1805	1,834,E-05	1,554,E-05	6,4,E+04	-0,058	0,202	0,010	0,035	0,920	1,285	0,161	0,224

REKAMAN DATA ANEMOMETER

Data anemometer dapat dilihat pada Tabel Lampiran E.1–E.8.

Tabel Lampiran E.1. Data Airflow Pengujian Silinder Polos

SINGLE BARE					
DRAG					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
24/08/2016	11:52:24	5,02	23,8	71,9	1002,1
24/08/2016	11:56:31	6,01	24,4	71,4	1002,1
24/08/2016	12:01:53	7,02	24,6	70,9	1002,1
24/08/2016	12:03:52	7,97	24,7	71	1002,2
24/08/2016	12:06:05	8,99	24,8	71	1001,9
24/08/2016	12:08:41	9,97	24,9	70,8	1002,2
24/08/2016	12:10:40	11,04	24,9	70,4	1002
24/08/2016	12:12:56	12,02	24,9	70	1002
24/08/2016	12:15:21	12,99	25,1	69,6	1001,9
24/08/2016	12:17:23	13,99	25	69,4	1002
24/08/2016	12:21:12	14,98	25,1	68,9	1001,9
24/08/2016	12:23:28	15,95	25,1	68,8	1001,8
24/08/2016	12:26:38	17,01	25,3	68,5	1001,6
24/08/2016	12:28:29	18	25,2	68,4	1001,7
24/08/2016	12:30:38	18,97	25,3	68,2	1001,7
24/08/2016	12:32:59	20,03	25,3	68,2	1001,6
LIFT					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
19/08/2016	15:06:24	4,97	24,8	69,7	1000,5
19/08/2016	15:09:11	6,01	24,7	70,5	1000,3
19/08/2016	15:11:56	6,96	24,8	70,6	1000,2
19/08/2016	15:15:17	7,95	24,9	71,1	1000,3
19/08/2016	15:18:05	9,01	25	72,4	1000,2
19/08/2016	15:21:22	9,98	25	72,8	1000,2
19/08/2016	15:25:55	11	25,1	74,1	1000,3
19/08/2016	15:28:27	11,96	25,2	74,3	1000,2
19/08/2016	15:30:53	12,98	25,3	73,3	1000,2
19/08/2016	15:33:17	13,97	25,3	73,1	1000,4
19/08/2016	15:35:38	14,96	25,1	72,6	1000,3
19/08/2016	15:37:40	15,99	25,2	72,6	1000,4
19/08/2016	15:39:58	16,96	25,2	72,5	1000,4
19/08/2016	15:46:26	18,05	25,4	72,8	1000,5
19/08/2016	15:48:43	18,97	25,5	73,4	1000,4
19/08/2016	15:52:07	20,02	25,7	74,5	1000,3

Tabel Lampiran E.2. Data Airflow Pengujian Silinder Helics

SINGLE HELICS					
DRAG					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
26/08/2016	14:40:11	5,01	24,3	74,8	1002,6
26/08/2016	14:45:59	6,02	24,6	72,8	1002,7
26/08/2016	14:50:51	6,98	24,6	72,7	1002,6
26/08/2016	14:53:24	8	24,7	70,9	1002,7
26/08/2016	14:56:18	9,04	24,8	70,6	1002,7
26/08/2016	15:00:46	10,03	24,8	71,4	1002,7
26/08/2016	15:04:15	10,98	24,9	71,3	1002,6
26/08/2016	15:13:23	11,96	24,9	69,8	1002,6
26/08/2016	15:17:39	12,95	24,8	69,9	1002,6
26/08/2016	15:21:55	13,96	24,9	69,1	1002,7
26/08/2016	15:26:47	15,01	24,9	70,6	1002,6
26/08/2016	15:30:29	16,02	25,2	69,9	1002,7
26/08/2016	15:32:57	16,96	25,2	70,3	1002,7
26/08/2016	15:38:06	17,99	25,2	70,3	1002,8
26/08/2016	15:41:10	19,03	25,3	70,5	1002,8
26/08/2016	15:45:35	20,04	25,3	70,8	1002,7
LIFT					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
29/08/2016	14:56:36	5,04	24,2	78,8	1003,1
29/08/2016	15:01:05	6,04	24,2	77	1003
29/08/2016	15:04:19	7,01	24,2	75,8	1003
29/08/2016	15:08:28	8,03	24,4	75,1	1003
29/08/2016	15:10:36	9,01	24,5	76,1	1003,1
29/08/2016	15:17:27	10,01	24,5	74,1	1002,8
29/08/2016	15:22:08	10,98	24,5	72,5	1002,9
29/08/2016	15:24:43	11,99	24,6	72,2	1002,8
29/08/2016	15:30:26	13,03	24,6	72	1002,7
29/08/2016	15:32:49	13,99	24,7	71,3	1002,6
29/08/2016	15:34:54	14,97	24,7	71,6	1002,7
29/08/2016	15:39:15	15,95	24,5	71,3	1002,9
29/08/2016	15:43:42	16,97	24,6	71,7	1003
29/08/2016	15:47:37	17,95	24,7	72,2	1003
29/08/2016	15:51:04	19	24,7	72,6	1002,8
29/08/2016	15:53:20	20,02	24,8	72,1	1002,9

Tabel Lampiran E.3. Data Airflow Pengujian 1,75D Lift Tandem

1,75D Lift Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
07/09/2016	12:35:15	5	23,8	73,6	1005,2
07/09/2016	12:37:23	5,97	24,1	74,1	1005,1
07/09/2016	12:39:28	6,98	24,2	73,7	1005
07/09/2016	12:42:29	7,99	24,4	73,6	1005
07/09/2016	12:44:04	9	24,6	74,9	1005,1
07/09/2016	12:46:37	10,03	24,6	71,4	1005,1
07/09/2016	12:47:31	11	24,8	72,7	1005
07/09/2016	12:49:47	12,02	24,8	71,6	1005
07/09/2016	12:52:00	13,03	24,9	72,4	1005
07/09/2016	12:54:24	14,04	25,1	71,9	1005
07/09/2016	12:56:11	15,02	25,2	72,6	1005
07/09/2016	13:00:31	15,97	25,2	72,5	1005
07/09/2016	13:02:38	16,99	25,2	73,2	1004,9
07/09/2016	13:06:38	17,99	25,4	73,6	1004,8
07/09/2016	13:07:46	18,99	25,3	73,6	1004,8
07/09/2016	13:09:30	20,02	25,3	74,1	1004,7

Tabel Lampiran E.4. Data Airflow Pengujian 3D Lift Tandem

3D Lift Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
07/09/2016	13:59:43	5,02	23,8	78,3	1004,4
07/09/2016	14:02:53	6	24	77,5	1004,2
07/09/2016	14:05:28	7,05	24,1	77,2	1004,1
07/09/2016	14:11:22	7,99	24,2	75,8	1004,1
07/09/2016	14:22:13	9,02	24,5	74,4	1003,7
07/09/2016	14:24:44	10,05	24,5	73,6	1003,8
07/09/2016	14:26:38	11,02	24,7	75,6	1003,7
07/09/2016	14:29:52	12,05	24,6	72,5	1003,6
07/09/2016	14:32:29	13,01	24,7	71,7	1003,7
07/09/2016	14:34:21	14,01	24,8	71,7	1003,5
07/09/2016	14:36:28	14,99	25	71,9	1003,6
07/09/2016	14:40:08	15,98	24,9	71,2	1003,8
07/09/2016	14:41:12	16,97	24,9	70,6	1003,7
07/09/2016	14:43:34	18,04	24,8	69,9	1003,7
07/09/2016	14:45:38	19,05	24,8	70,8	1003,6
07/09/2016	14:47:23	20,03	25	70,1	1003,5

Tabel Lampiran E.5. Data Airflow Pengujian 5D Lift Tandem

5D Lift Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
08/09/2016	9:35:17	5	23,6	74,9	1008,7
08/09/2016	9:35:51	6,01	23,7	75	1008,7
08/09/2016	9:38:33	6,95	23,8	74,9	1008,5
08/09/2016	9:41:04	7,99	23,9	74,6	1008,7
08/09/2016	9:46:27	9,04	24,3	74,2	1008,6
08/09/2016	9:47:52	9,96	24,3	74,5	1008,6
08/09/2016	9:49:36	11,02	24,3	73,2	1008,6
08/09/2016	9:52:59	11,97	24,3	73,3	1008,6
08/09/2016	9:55:31	13,01	24,5	73	1008,5
08/09/2016	9:57:29	13,95	24,3	72,9	1008,6
08/09/2016	9:59:38	15,05	24,3	72,5	1008,7
08/09/2016	10:02:30	16,03	24,3	72,2	1008,5
08/09/2016	10:04:15	17,02	24,4	72,1	1008,5
08/09/2016	10:06:40	18,02	24,5	72,2	1008,3
08/09/2016	10:07:25	18,95	24,4	72,4	1008,3
08/09/2016	10:31:38	19,95	24,4	73,2	1008,3

Tabel Lampiran E.6. Data Airflow Pengujian 1,75D Drag Tandem

1,75D Drag Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
06/09/2016	15:25:10	5,04	23,6	73	1003,7
06/09/2016	15:27:32	6,02	23,8	73,4	1003,8
06/09/2016	15:28:48	6,98	23,8	72,9	1003,9
06/09/2016	15:31:03	8,02	24	73	1003,9
06/09/2016	15:34:11	8,99	24,2	72,8	1003,8
06/09/2016	15:39:48	10,01	24,6	71,4	1003,9
06/09/2016	15:42:37	11,03	24,7	70,6	1003,9
06/09/2016	15:46:48	11,97	24,8	70,2	1003,8
06/09/2016	15:49:51	13,05	25	69,2	1003,9
06/09/2016	15:51:13	13,97	24,9	69,7	1004
06/09/2016	15:53:24	15,02	24,9	68,9	1003,9
06/09/2016	15:56:01	15,98	25	68,5	1003,9
06/09/2016	15:57:42	16,95	25,1	68,8	1003,8
06/09/2016	15:59:43	18,03	25	68	1003,8
06/09/2016	16:03:44	19,04	25	68,1	1003,8
06/09/2016	16:05:45	20,04	25,1	68,3	1003,9

Tabel Lampiran E.7. Data Airflow Pengujian 3D Drag Tandem

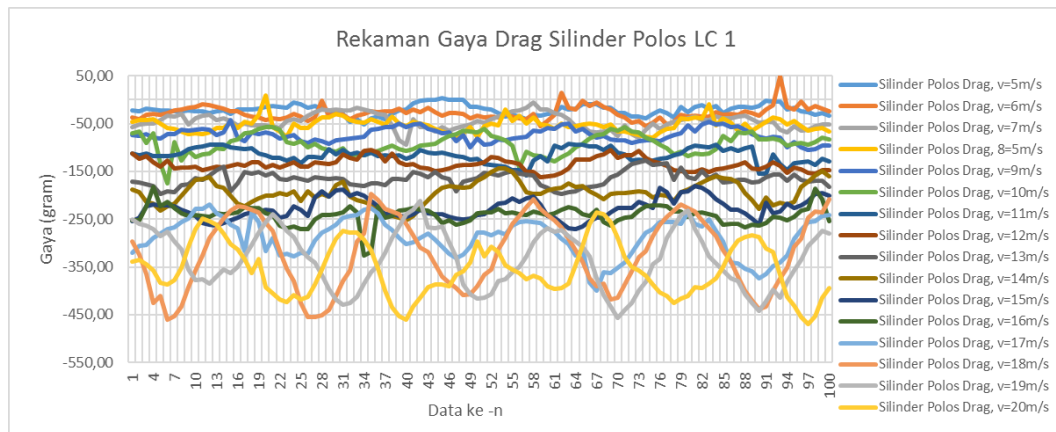
3D Drag Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
06/09/2016	11:16:37	5,05	23,6	72	1007,4
06/09/2016	11:18:57	6,04	24,1	71,5	1007,4
06/09/2016	11:20:37	7,04	24	71,3	1007,4
06/09/2016	11:24:58	8,01	24,1	71,1	1007,4
06/09/2016	11:27:39	9,03	24,6	71	1007,3
06/09/2016	11:30:25	9,99	24,7	70,3	1007,3
06/09/2016	11:37:02	11	24,9	69,9	1007,3
06/09/2016	11:38:29	12,03	24,9	69,3	1007,1
06/09/2016	11:42:13	13,02	25	69,6	1007,1
06/09/2016	11:44:06	14,05	25	69	1007
06/09/2016	11:45:12	15,04	24,9	68,7	1007
06/09/2016	11:49:34	15,98	25	68,3	1006,8
06/09/2016	11:51:11	17,03	25	68,1	1006,8
06/09/2016	11:53:28	17,99	25	68,1	1006,8
06/09/2016	11:58:00	18,99	25,1	67,7	1006,7
06/09/2016	11:59:22	20,02	25,1	67,7	1006,6

Tabel Lampiran E.8. Data Airflow Pengujian 5D Drag Tandem

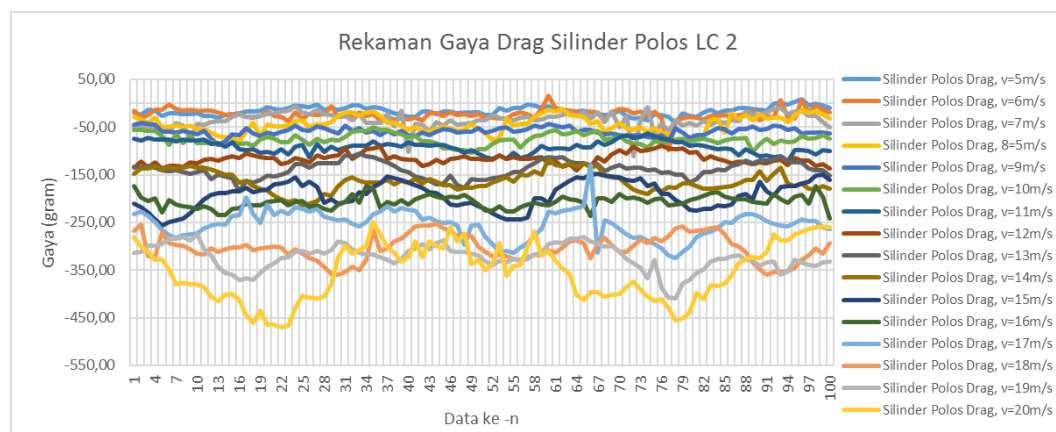
5D Drag Tandem					
Date	Time	Vel	T	H	BP
dd/MM/yyyy	hh:mm:ss	m/s	deg C	%rh	hPa
06/09/2016	9:34:05	4,97	24,3	71,9	1008,7
06/09/2016	9:37:42	6,02	24,4	71,9	1008,6
06/09/2016	9:42:05	7,04	24,7	72,5	1008,6
06/09/2016	9:46:08	7,97	24,7	71,8	1008,7
06/09/2016	9:49:25	9,04	24,8	71,3	1008,6
06/09/2016	9:51:24	10,05	24,8	71,6	1008,6
06/09/2016	9:54:25	11,03	24,7	69,9	1008,6
06/09/2016	9:55:47	11,98	24,9	70	1008,5
06/09/2016	9:57:41	13,03	24,9	69,3	1008,5
06/09/2016	9:59:44	13,97	24,9	69,4	1008,5
06/09/2016	10:03:12	15,05	25	69	1008,4
06/09/2016	10:05:55	16,02	24,9	68,6	1008,4
06/09/2016	10:09:24	17,04	25	68,7	1008,3
06/09/2016	10:12:22	17,98	24,9	68,7	1008,3
06/09/2016	10:13:17	19,04	24,9	68,6	1008,2
06/09/2016	10:19:57	20,05	25	68,5	1008,3

REKAMAN DATA LOAD CELL

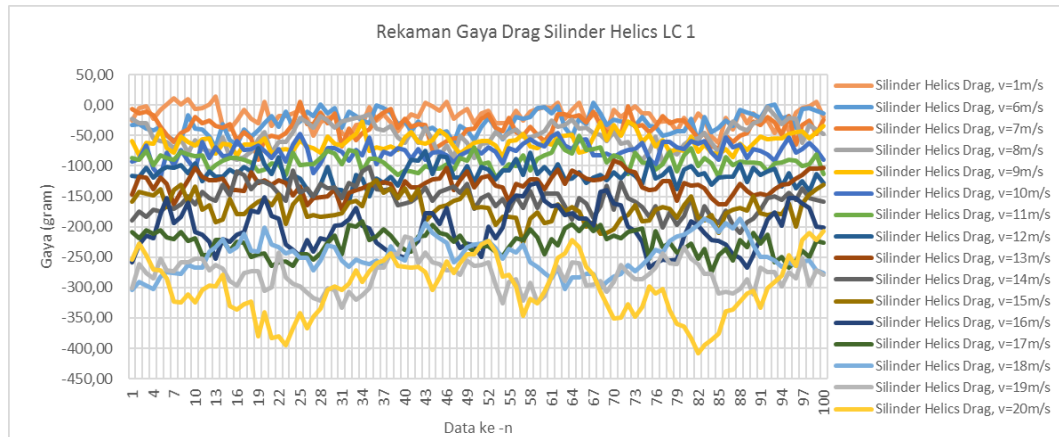
Pada pengujian gaya, pengambilan data dilakukan sebanyak dua kali untuk satu kecepatan dalam satu konfigurasi pengujian. Sedangkan untuk sekali pengujian, ada 1000 data yang diperoleh untuk satu load cell. 1000 data ini mewakili 1000 sinyal yang ditangkap load cell dalam satu detik. Sehingga ada total 2000 data per load cell per kecepatan dalam satu kali pengujian. Berikut adalah plot grafik 100 data pertama dari masing - masing load cell untuk seluruh kondisi pengujian gaya (Gambar Lampiran F.1-F.32)



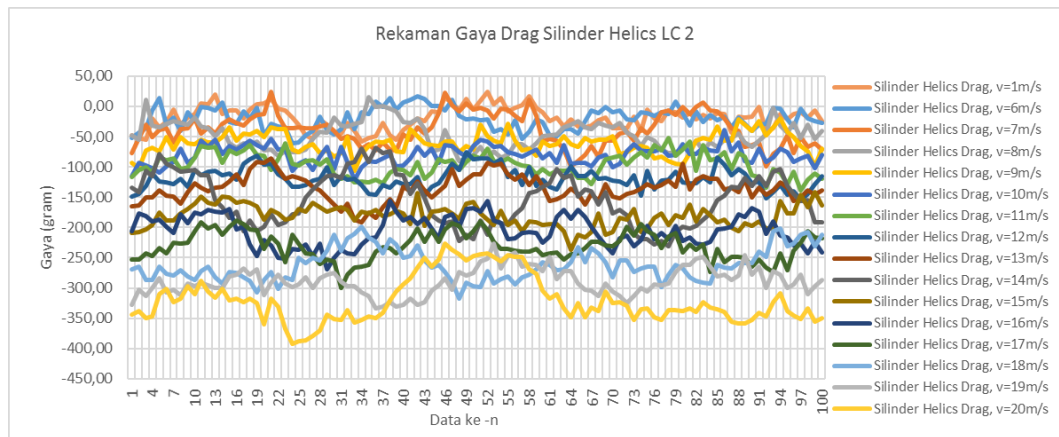
Gambar Lampiran F.1. Rekaman Gaya Drag Silinder Polos Loadcell 1



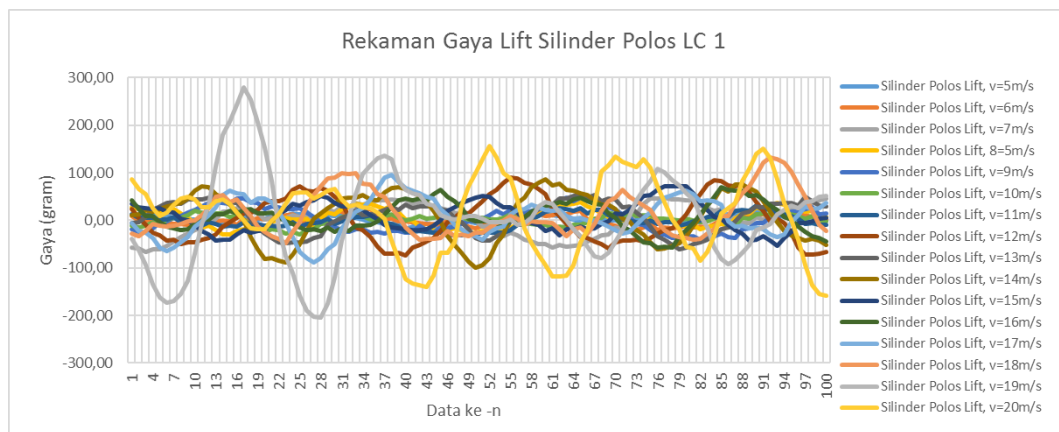
Gambar Lampiran F.2. Rekaman Gaya Drag Silinder Polos Loadcell 2



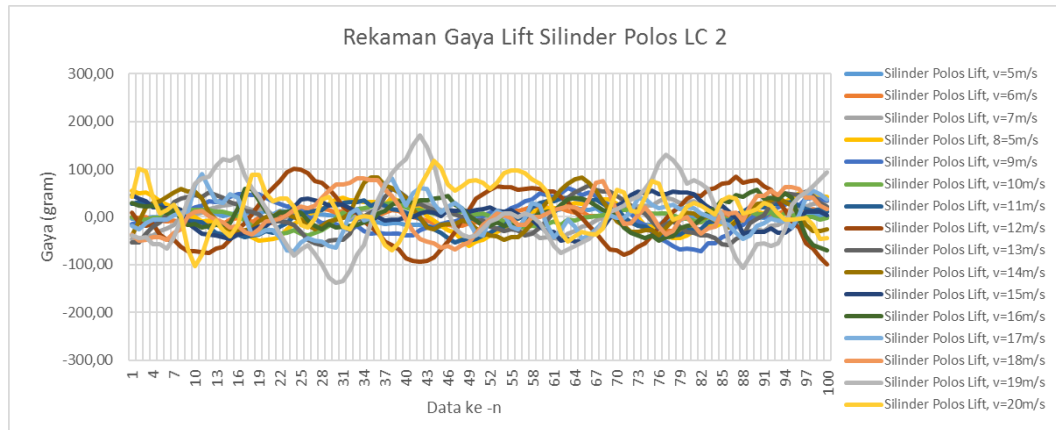
Gambar Lampiran F.3. Rekaman Gaya Drag Silinder Helics Loadcell 1



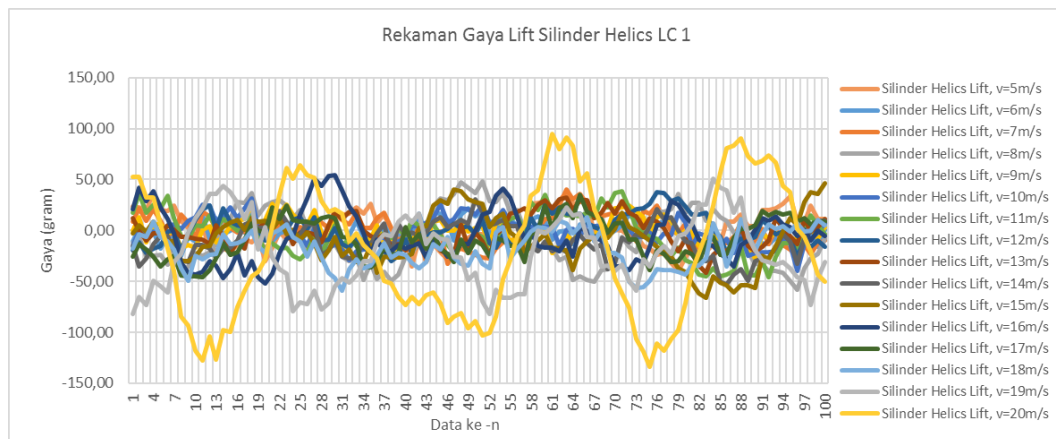
Gambar Lampiran F.4. Rekaman Gaya Drag Silinder Helics Loadcell 2



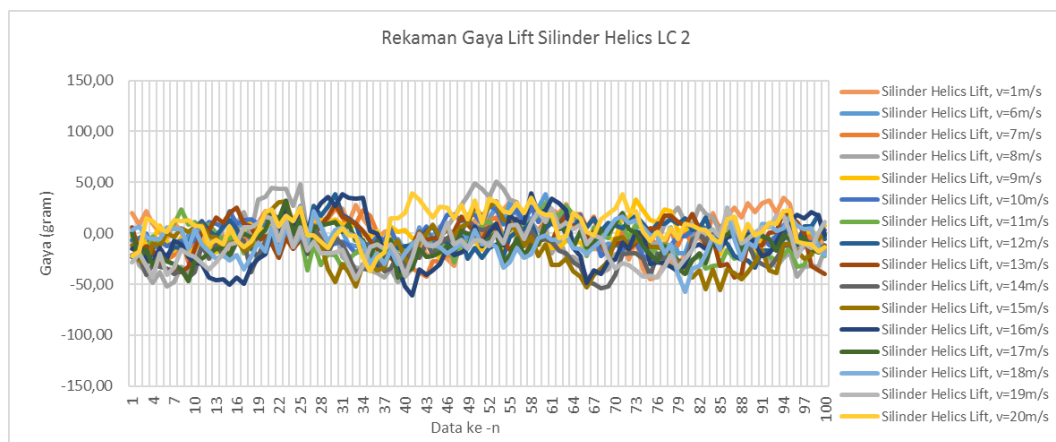
Gambar Lampiran F.5. Rekaman Gaya Lift Silinder Polos Loadcell 1



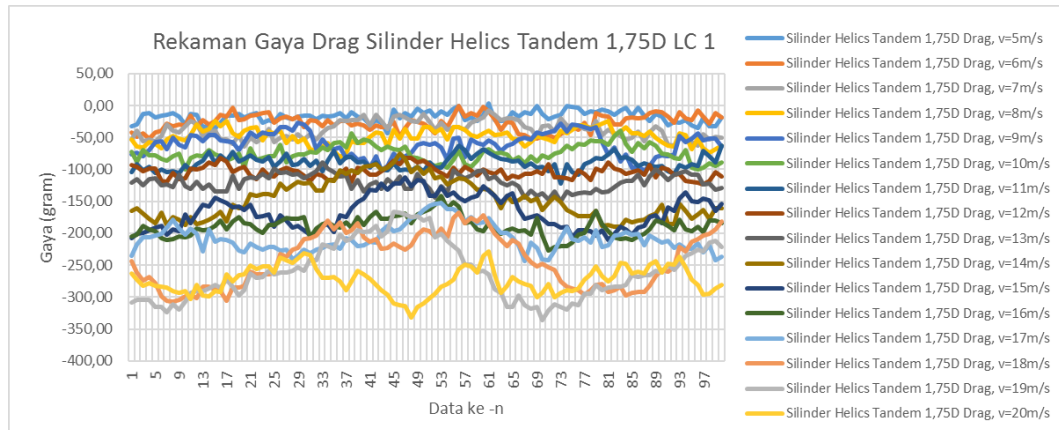
Gambar Lampiran F.6. Rekaman Gaya Lift Silinder Polos Loadcell 2



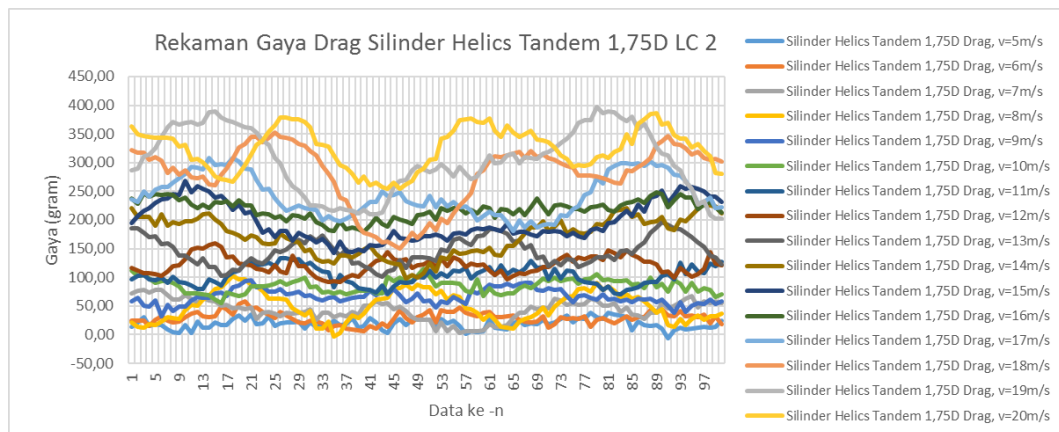
Gambar Lampiran F.7. Rekaman Gaya Lift Silinder Helics Loadcell 1



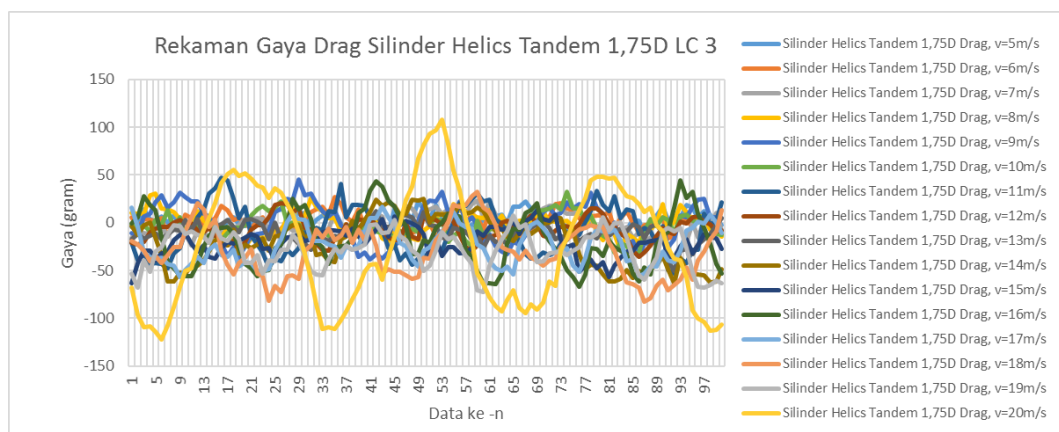
Gambar Lampiran F.8. Rekaman Gaya Lift Silinder Helics Loadcell 2



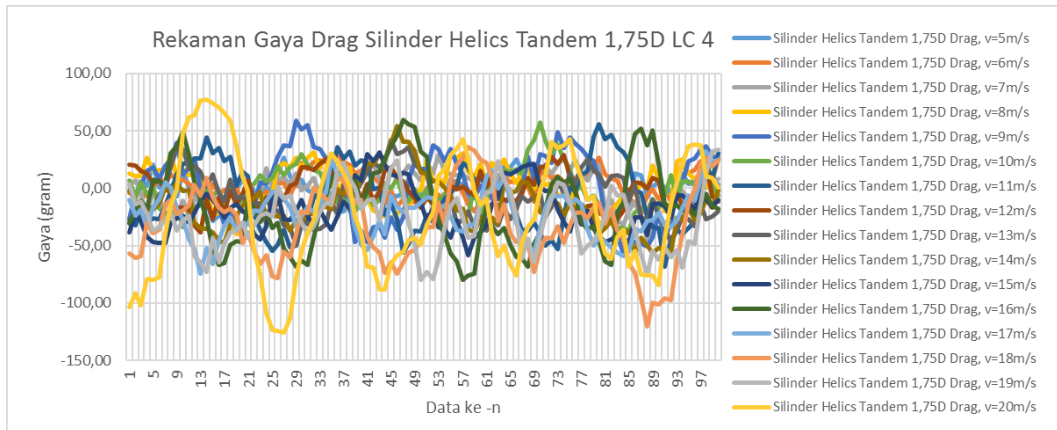
Gambar Lampiran F.9. Rekaman Gaya Drag Tandem 1,75D Loadcell 1



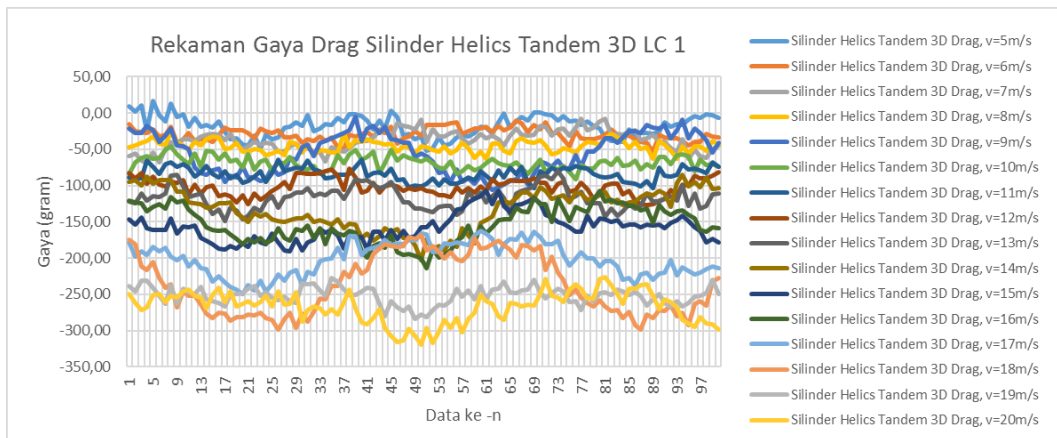
Gambar Lampiran F.10. Rekaman Gaya Drag Tandem 1,75D Loadcell 2



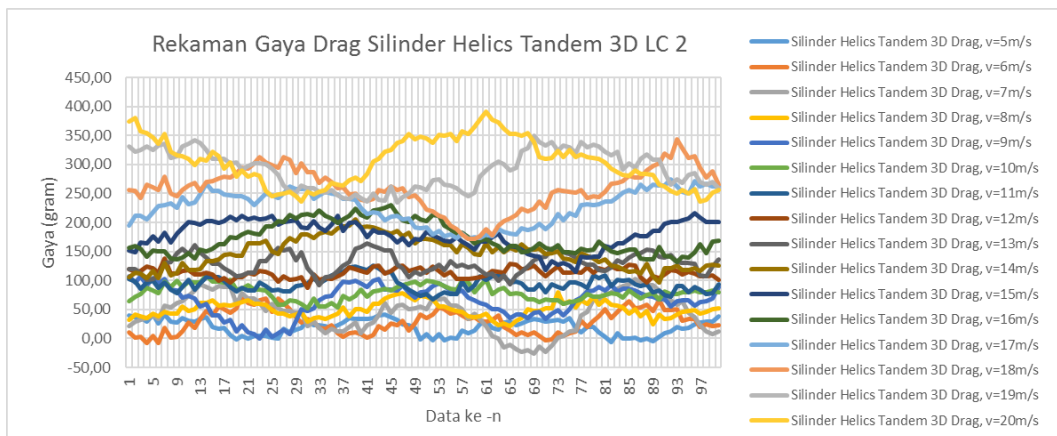
Gambar Lampiran F.11. Rekaman Gaya Drag Tandem 1,75D Loadcell 3



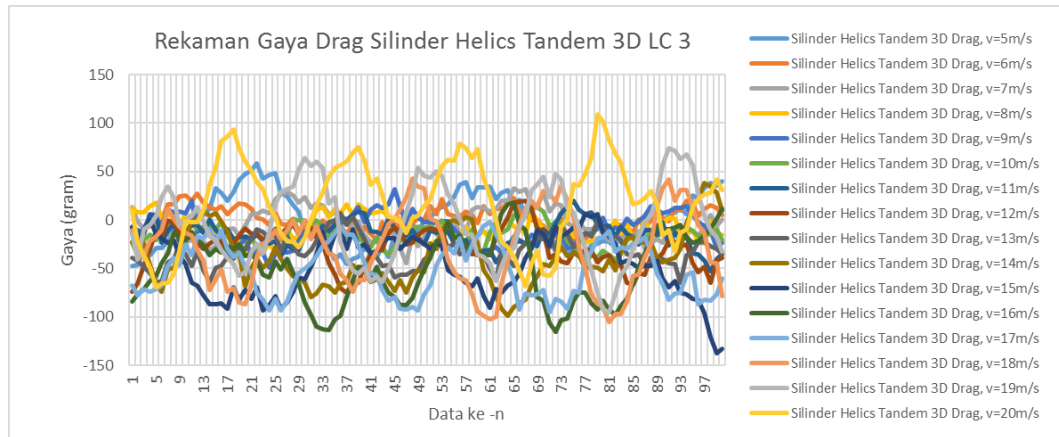
Gambar Lampiran F.12. Rekaman Gaya Drag Tandem 1,75D Loadcell 4



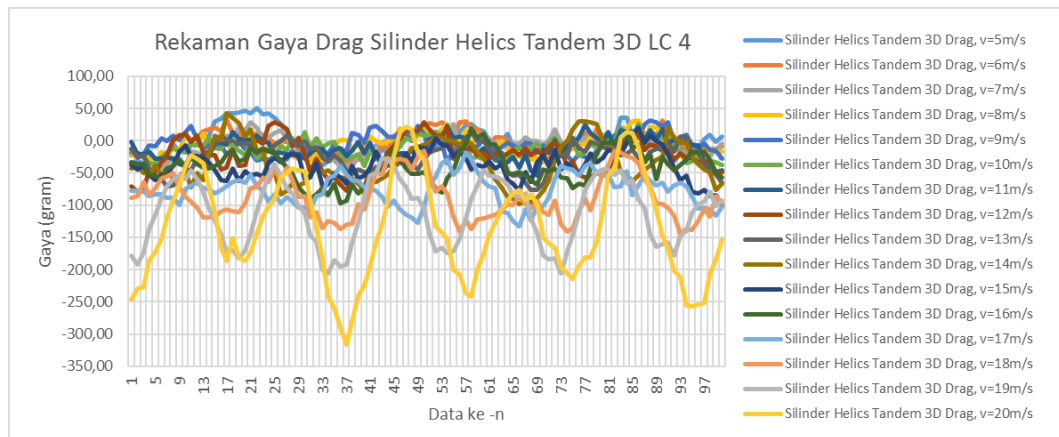
Gambar Lampiran F.13. Rekaman Gaya Drag Tandem 3D Loadcell 1



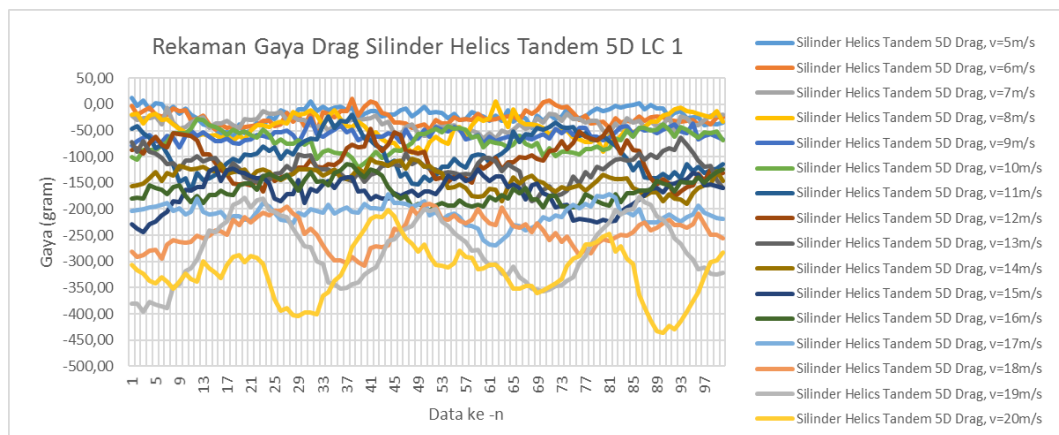
Gambar Lampiran F.14. Rekaman Gaya Drag Tandem 3D Loadcell 2



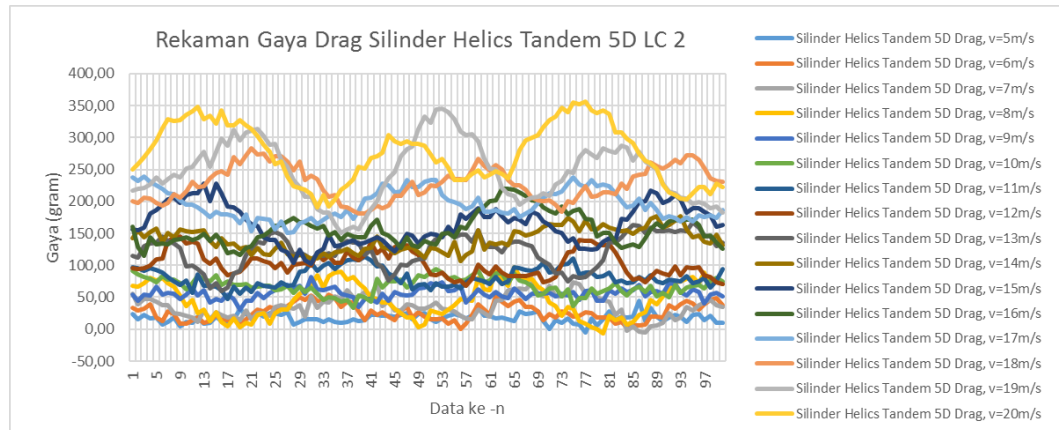
Gambar Lampiran F.15. Rekaman Gaya Drag Tandem 3D Loadcell 3



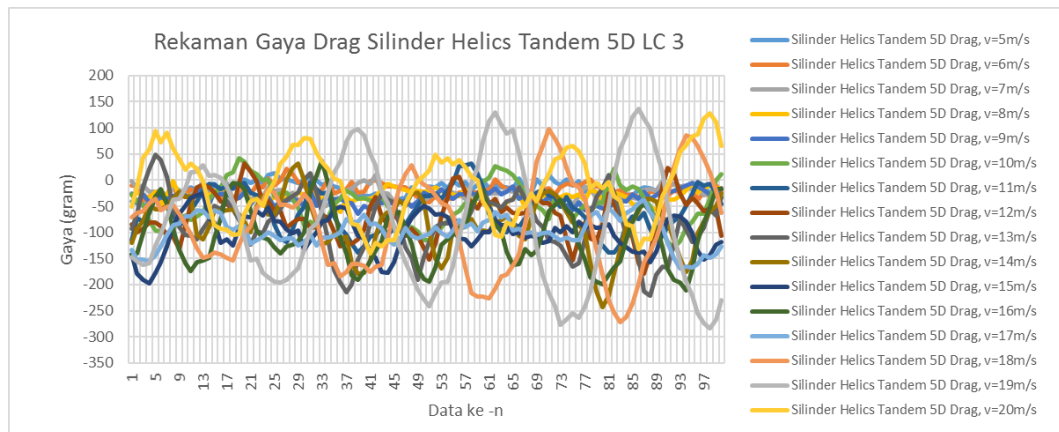
Gambar Lampiran F.16. Rekaman Gaya Drag Tandem 3D Loadcell 4



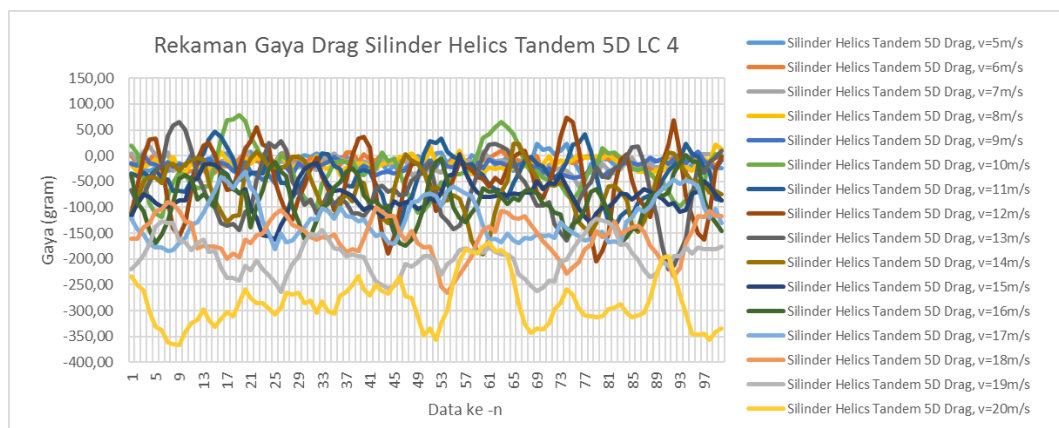
Gambar Lampiran F.17. Rekaman Gaya Drag Tandem 5D Loadcell 1



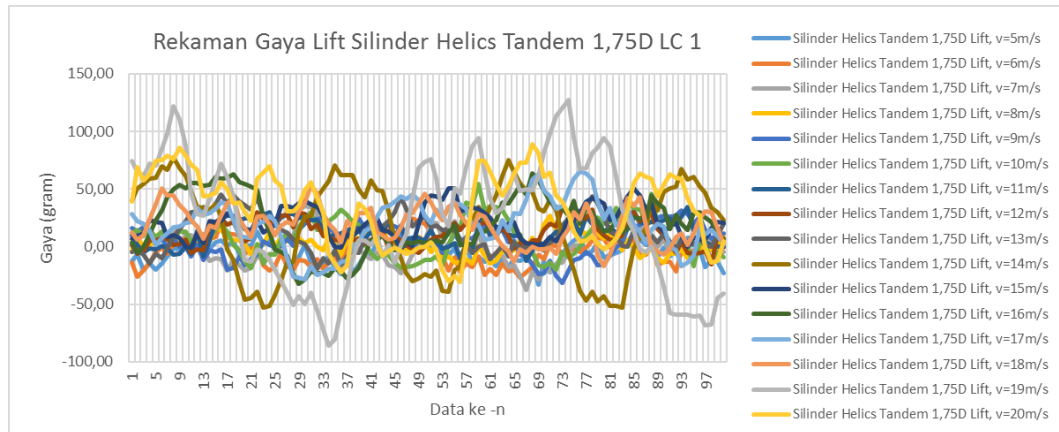
Gambar Lampiran F.18. Rekaman Gaya Drag Tandem 5D Loadcell 2



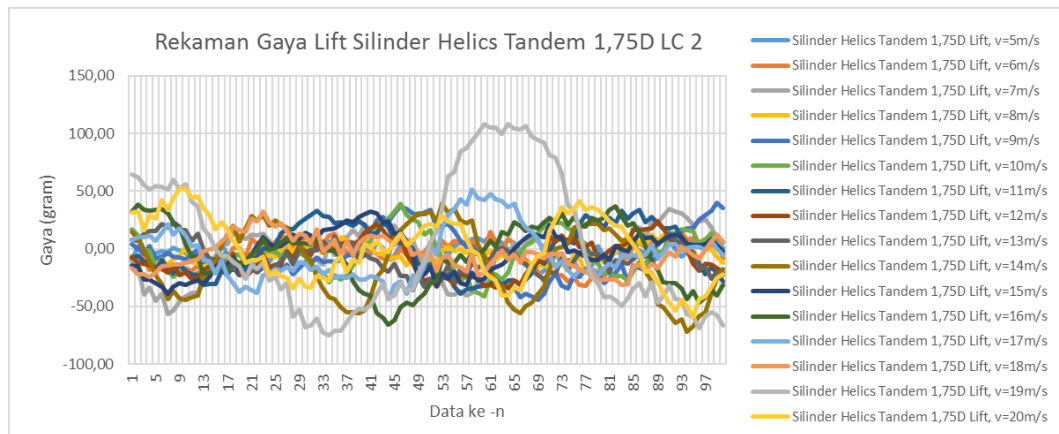
Gambar Lampiran F.19. Rekaman Gaya Drag Tandem 5D Loadcell 3



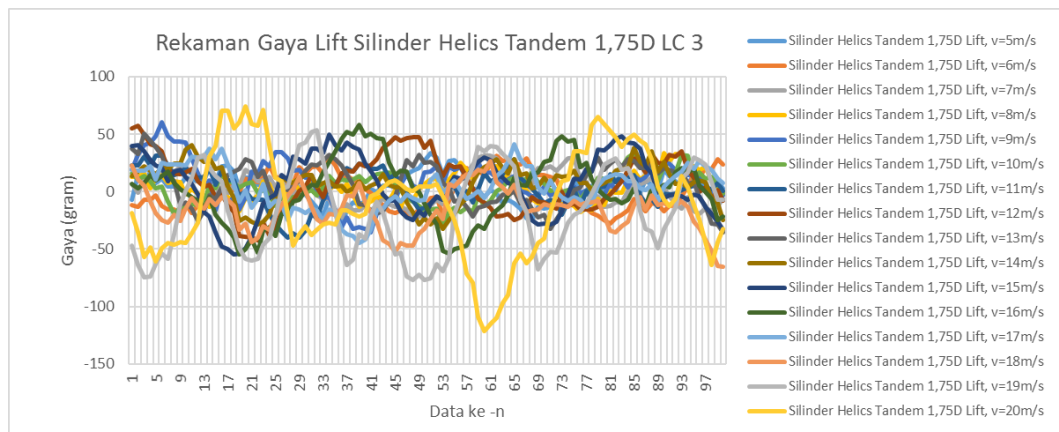
Gambar Lampiran F.20. Rekaman Gaya Drag Tandem 5D Loadcell 4



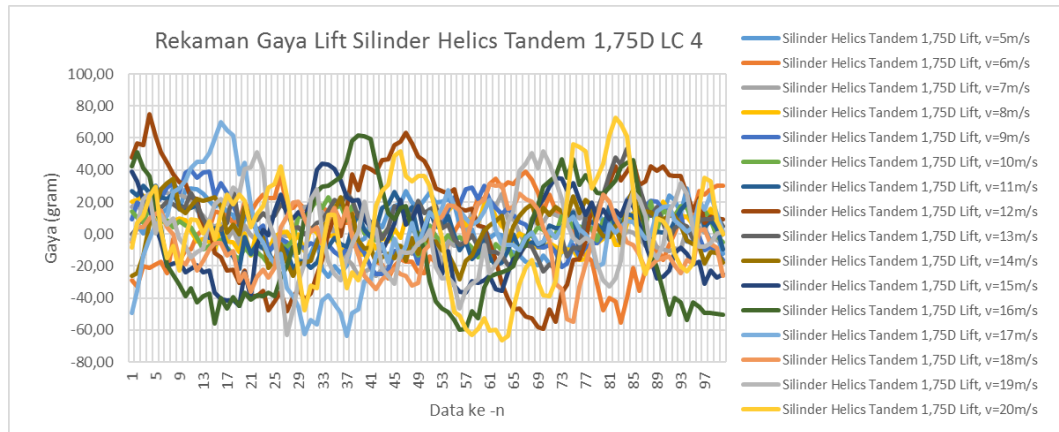
Gambar Lampiran F.21. Rekaman Gaya Lift Tandem 1,75D Loadcell 1



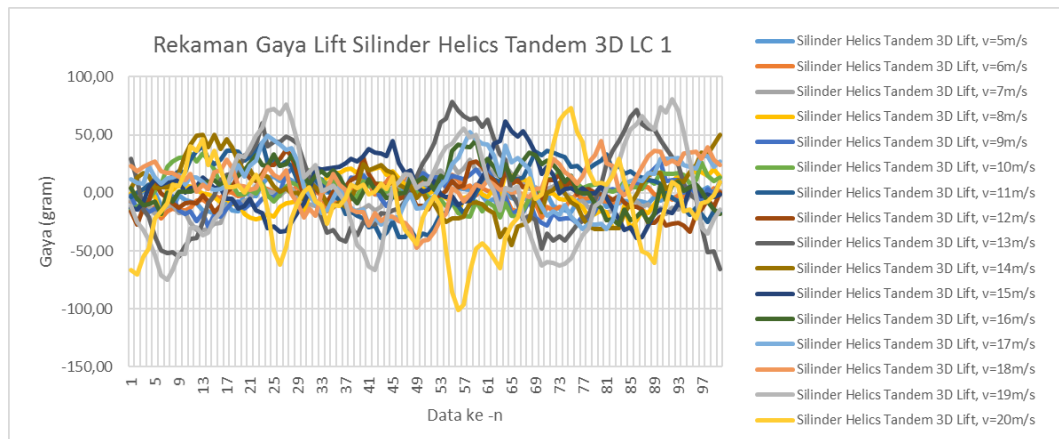
Gambar Lampiran F.22. Rekaman Gaya Lift Tandem 1,75D Loadcell 2



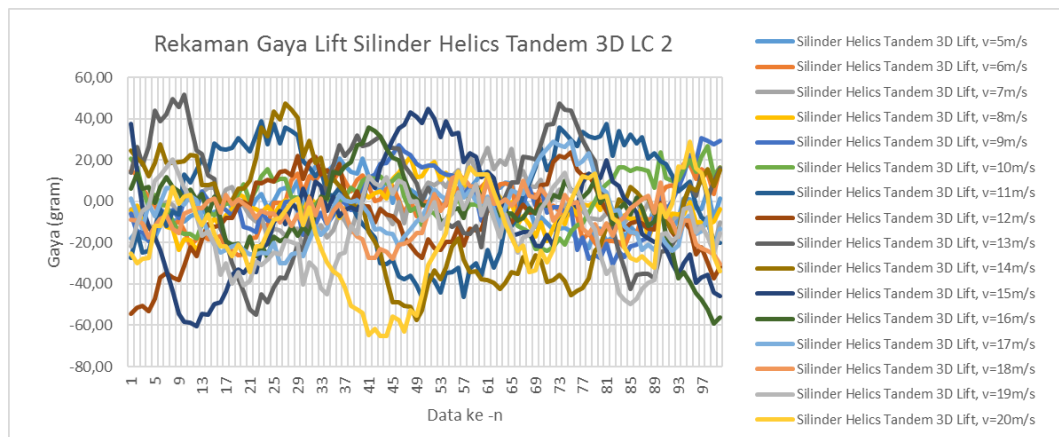
Gambar Lampiran F.23. Rekaman Gaya Lift Tandem 1,75D Loadcell 3



Gambar Lampiran F.24. Rekaman Gaya Lift Tandem 1,75D Loadcell 4



Gambar Lampiran F.25. Rekaman Gaya Lift Tandem 3D Loadcell 1



Gambar Lampiran F.26. Rekaman Gaya Lift Tandem 3D Loadcell 2

BIODATA PENULIS



Kresna Hadi Dwipayana, dilahirkan pada tanggal 23 Desember 1993 di sebuah rumah sakit di Surabaya. Menempuh pendidikan formal sejak SD hingga SMA di sekolah negeri kabupaten Sidoarjo. Pendidikan formal tingkat dasar ditempuh penulis di SD Negeri Suko, Sukodono, Sidoarjo pada tahun 2000-2006. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan tingkat menengah pertama di SMP Negeri 1 Taman, Sidoarjo pada tahun 2006-2009. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 1 Taman, Sidoarjo pada tahun 2009-2012. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Taman, penulis melanjutkan studi S1 di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan – ITS Surabaya. Penulis aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan yang diadakan ormawa ITS baik tingkat jurusan maupun institut seperti kepanitiaan “30 Tahun Jurusan Teknik Kelautan” oleh Himatekla, “Young Environmental Leadership Program (YELP 2014)” oleh Kementrian SOSMAS BEM ITS, “ITS Mengajar for Indonesia (IFI 2014)” oleh BSO IECC BEM ITS, menjadi Koordinator Tim Kaderisasi dibawah naungan PSDM Himatekla 2014/2015. Dalam bidang keilmuan, penulis pernah mengikuti Seminar Internasional “International Seminar on Marine Technology Innovation (SENTA 2016)” sebagai pembicara. Tugas akhir penulis dedikasikan untuk bidang Hidrodinamika Lepas Pantai (Offshore Hydrodynamic)

Email : khdwipayana@gmail.com